



Gestion de contraintes au cours de la resolution d'un probleme de conception de reseaux informatiques

Françoise Darses

► To cite this version:

Françoise Darses. Gestion de contraintes au cours de la resolution d'un probleme de conception de reseaux informatiques. [Rapport de recherche] RR-1164, INRIA. 1990. inria-00075394

HAL Id: inria-00075394

<https://inria.hal.science/inria-00075394>

Submitted on 24 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNITÉ DE RECHERCHE
INRIA-ROCQUENCOURT

Rapports de Recherche

N° 1164

Programme 8
Communication Homme-Machine

GESTION DE CONTRAINTES AU COURS DE LA RESOLUTION D'UN PROBLEME DE CONCEPTION DE RESEAUX INFORMATIQUES

Françoise DARSEs

Février 1990

Institut National
de Recherche
en Informatique
et en Automatique

Domaine de Voluceau
Rocquencourt
BP 105
78153 Le Chesnay Cedex
France
Tél (1) 39 63 55 11



★ RR - 1164 ★

Programme 8
Communication homme machine

GESTION DE CONTRAINTES
AU COURS DE LA RESOLUTION D'UN PROBLEME DE CONCEPTION
DE RESEAUX INFORMATIQUES

Problem solving by constraint posting
in computer network design

✍ Françoise DARSES

Janvier 1990

GESTION DE CONTRAINTES

AU COURS DE LA RESOLUTION D'UN PROBLEME DE CONCEPTION

DE RESEAUX INFORMATIQUES

Résumé

Une approche des processus de résolution de problèmes de conception en terme de gestion de contraintes est proposée. On expose le cadre théorique dans lequel cette problématique s'inscrit, en rappelant le rôle crucial de la planification dans les activités de résolution de problèmes de conception. On montre alors que les processus de planification peuvent être compris comme la gestion des multiples contraintes liées au problème. On examine comment ce concept a été développé tant en psychologie que dans d'autres disciplines, en particulier l'intelligence artificielle, et on décrit une formalisation de la notion de contrainte dont l'application à l'étude du comportement psychologique semble prometteuse. A partir de ces éléments théoriques, on a construit un cadre méthodologique pour l'analyse de l'activité de conception, dont la mise à l'épreuve constitue l'objectif essentiel de cette étude. Cette méthodologie est éprouvée au cours d'investigations expérimentales conduites dans le domaine de la conception de réseaux informatiques. Les données recueillies sont des protocoles verbaux. L'interprétation des résultats désigne les points qui devront faire l'objet de modifications méthodologiques et d'approfondissements théoriques pour l'élaboration d'un modèle psychologique de l'activité de conception en termes de contraintes.

Mots clés : gestion de contraintes, problème de conception, planification

Summary

A constraint posting approach is proposed for the modelling of the processes involved in design situations. The theoretical background is exposed, emphasizing that planning activity is crucial in design. The assumption is that the planning processes can be understood as the management of the constraints bounded to the problem. We examine how this has been taken into account in psychology and in others domains as well, especially in artificial intelligence. A formalization of the concept of constraint is then described, the application of which seems promising for the study of the psychological behaviour of the designers. A methodological framework is built in order to analyze the design activity. Its evaluation is performed through experimental investigations conducted in the domain of network design. The data collected are verbal protocols. The interpretation of the results points at the methodological and theorical spots to be improved for the elaboration of a psychological model of design in terms of constraints posting.

Key-words : constraints posting, design , planning

Cette recherche a été conduite dans le cadre d'un projet ESPRIT 2 "MMI2: A Multi-Modal Interface for Man-Machine Interaction". Nous remercions vivement A. Vermeiren et M. Vaerman, de la société BIM, pour leur précieuse collaboration, ainsi que les experts de cette entreprise qui ont bien voulu participer à l'expérimentation.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1 LES MECANISMES DE PLANIFICATION DANS LA RESOLUTION DE PROBLEMES DE CONCEPTION	4
1.1 La démarche descendante	4
1.2 Les modèles dits hiérarchiques	5
1.3 La démarche ascendante.....	6
1.4 Les modèles dits opportunistes.....	7
2 L'ACTIVITE DE PLANIFICATION ENVISAGEE COMME LA GESTION DE CONTRAINTES	10
2.1 La prise en compte des contraintes dans les problèmes de conception	10
2.2.1 Définition opérationnelle.....	15
2.2.2 Contraintes prescrites et Contraintes déduites.....	16
2.2.3 Contraintes de préférence et contraintes de validité.....	17
2.3 La gestion des contraintes dans le cours du processus de planification.....	18
2.4 Conclusion	20
3 L'ACTIVITE DE CONCEPTION DE CONFIGURATION DE RESEAUX INFORMATIQUES.....	22
3.1 Le domaine	22
3.2 Les données initiales	22
3.2.1 Cahier des charges	23
3.2.2 Données topographiques	23
3.2.3 Matériel	23
3.3 Description de l'activité.....	24
3.3.1 Multiples cycles de conception.....	24
3.3.2 Méthode de conception	24
3.3.3 Le dessin comme support de la conception.....	25
3.3.4 Conception individuelle et collective	25
3.3.5 Conclusion.....	25
4 SITUATION EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIE D'ANALYSE.....	26
4.1 Construction de l'expérience.....	26
4.1.1 Une situation réaliste et un problème de référence.....	26
4.1.2 Une comparaison des niveaux d'expertise	26
4.1.3 Méthode d'information à la demande	27
4.1.4 Procédure expérimentale.....	27
4.2 Méthodologie d'analyse.....	27
4.2.1 Découpage des protocoles.....	28
4.2.2 Catégorisation des unités d'expression	28
4.3 Hypothèses.....	32
5 RESULTATS	33
5.1 Usage des contraintes relativement aux autres catégories.....	33
5.2 Contraintes de validité et contraintes de préférence.....	35
5.3 Opérations sur les contraintes	35
5.4 Conclusion	37
6 DISCUSSION ET CONCLUSION.....	38
6.1 Fiabilité de la catégorisation	38
6.2 Dénombrement des unités d'expression de la catégorie Contraintes.....	38
6.3 Niveaux de contraintes.....	39
6.4 Activité d'évaluation et gestion de contraintes.....	39
6.5 Mécanismes de propagation des contraintes et contraintes implicites.....	40
6.6 Conclusion	40
BIBLIOGRAPHIE.....	42

INTRODUCTION

Dans le domaine de la résolution de problème, on admet une distinction entre trois classes de problèmes: les problèmes de transformation d'états, les problèmes d'induction de structure et les problèmes de conception (Hoc, 1987).

Confronté à un **problème de transformation d'états**, le sujet se représente sa tâche comme le parcours d'un espace d'états, générés les uns à partir des autres par l'application de règles de transformation. Son activité est alors d'élaborer les opérations qui vont le conduire de l'état initial, clairement défini, jusqu'à un état final connu. Ce sont ces problèmes que le courant de recherche sur les modèles de traitement de l'information a le plus étudiés. Des exemples typiques en sont le jeu de la tour de Hanoï, ou encore certaines situations de contrôle de processus industriels.

Les problèmes d'induction de structures sont ceux où le sujet envisage sa tâche comme la recherche de relations pertinentes à instaurer au sein d'un ensemble de données. Ainsi en est-il par exemple des situations de diagnostic.

En ce qui concerne **les problèmes de conception**, les données initiales manipulées par les sujets sont exprimées dans des termes très différents des spécifications de la solution (Lawson, 1978). La tâche est alors considérée par le sujet comme la construction d'une représentation de plus en plus détaillée du but à atteindre (Hoc, 1987). L'activité de conception de réseaux informatiques dont nous présentons dans ce rapport une analyse, présente ces caractéristiques: les données initiales sont présentées sous formes d'informations topologiques (la description du bâtiment et du site à câbler), de spécifications fonctionnelles (les applications attribuées au réseau ainsi que la répartition des unités professionnelles dans le site), de contraintes budgétaires, de souhaits liés aux applications développées dans le site, etc... Ces données doivent être traduites par le concepteur en choix de matériel, tels que types de câbles, types de boîtes de connexion, type de machines, qui doivent être mis en oeuvre spatialement. Les termes ainsi posés sont précisés jusqu'à constituer une représentation complètement spécifiée du réseau.

Une caractéristique notable de cette classe de problème est la *multiplicité des solutions* admises au problème posé (Bisseret et al, 1988). Cette diversité des formes que peut revêtir l'objet final résulte en particulier de la variété des représentations de l'objet que les sujets ont construites dans le cours de leur démarche de conception, et de l'importance qu'ils ont accordée aux unes ou aux autres. La diversité des représentations de l'espace de la tâche par les concepteurs se traduit, dans les démarches adoptées, par la sélection préférentielle de certaines données du problème au détriment des autres. Ainsi, dans le domaine d'expertise de conception de réseaux locaux, tel concepteur fondera son processus de conception sur une attention prioritaire aux

informations concernant le type de machines à connecter sur le réseau, alors que tel autre élaborera son point de vue à partir de données fonctionnelles, comme la répartition des unités professionnelles dans le bâtiment. Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, une des conséquences de cette hétérogénéité du point de vue initial s'observe dans la diversité des solutions proposées. Un second exemple remarquable à l'égard de ce dernier point est la conception architecturale: des spécifications identiques ne produiront jamais la construction de deux bâtiments semblables.

Une seconde caractéristique communément reconnue à cette classe de problèmes est l'*absence de méthodes de résolution* pré-établies. Certes, l'expert connaît un certain nombre de procédures d'exécution, qu'il sait pouvoir appliquer pour résoudre certaines parties du problème et il dispose aussi de l'ensemble des stratégies qu'il a déjà employées dans des situations de résolution antérieures. Mais pour chaque cas à traiter, le concepteur devra déterminer quelles sont celles qu'il va adopter et il lui faudra définir les conditions de leur mise en oeuvre (Eastman, 1969; Lawson, 1978).

Deux mécanismes essentiels oeuvrent au cours du processus de conception. Le premier consiste en des activités de *planification*, définies comme des activités d'élaboration de plans, puis de mise en oeuvre de ceux-ci. Ces activités de planification permettent de gérer l'intégration progressive des données à prendre en compte pour réaliser le but fixé et sont cruciales pour parvenir à satisfaire les contraintes souvent conflictuelles qui portent sur l'objet à concevoir (Lebahar, 1983; Hoc, 1987). Le second mécanisme intervenant au cours du processus de résolution se traduit par les *modifications successives de la représentation du problème* effectuées par le concepteur. Le cadre de cette étude ne permettra pas de conduire une réflexion concernant ce second point.

Les mécanismes de planification mis en oeuvre dans les problèmes de conception ont été jusqu'alors essentiellement interprétés comme l'*articulation de stratégies ascendantes et descendantes* (Hayes-Roth et Hayes-Roth, 1979; Hoc, 1987). Cependant, s'il est avéré que la résolution d'un problème de conception est en grande partie soumise à la mise en oeuvre de ces stratégies, il apparaît aussi qu'un processus de *satisfaction de contraintes*, autant évoqué par les concepteurs eux-mêmes que constaté par nombre de chercheurs (Eastman, 1970; Lebahar, 1983; Hoc, 1987), intervient d'une manière cruciale au cours de la résolution du problème. En lisant de ce point de vue chacune des caractéristiques des problèmes de conception qu'on a énoncées plus haut, on peut ébaucher une interprétation des mécanismes de résolution de problème en terme de gestion de contraintes: les spécifications initiales d'un problème de conception peuvent être comprises comme des contraintes auxquelles doit se plier le concepteur; l'impossibilité qu'il y a à décrire pour cette classe de problème des méthodes de résolution peut être expliquée par la complexité du traitement de l'intégration progressive des contraintes liées

au problème et la difficulté résidant dans la gestion de leurs conflits; quant à la multiplicité des solutions, elle peut être vue comme la conséquence des choix personnels des concepteurs de privilégier telle contrainte plutôt que telle autre au cours du cheminement de résolution. On constate donc qu'une interprétation des processus de résolution de problèmes de conception en termes de contraintes est, au premier abord, une hypothèse plausible. Une mise en oeuvre de ce point de vue a d'ailleurs été développée par de nombreux travaux réalisés en particulier dans le domaine de l'intelligence artificielle (Stefik, 1981a&b; Fox et al, 1982; Leler, 1985; Manago, 1985; Chandra et Marks, 1986; Sriram et Maher, 1986; Descotte et Delesalle, 1986; Nadel, 1986; Guesguen et al, 1987; Mittal et Frayman, 1987; Brinkley et al, 1987; Janssen et al, 1989; Oplobedu et al, 1989). Une réflexion sur la validité psychologique de cette approche est maintenant nécessaire.

L'objectif à long terme de cette recherche consiste en une mise à l'épreuve des conditions de validité d'une modélisation de l'activité de conception en terme de gestion de contraintes. Les perspectives vont dans deux directions complémentaires. La première conduit vers l'élaboration d'un modèle psychologique des processus de résolution de problèmes de conception, tandis que la seconde s'oriente vers la spécification d'aides logicielles. Restreint à cette étude, l'objectif est de délimiter le cadre théorique pour une analyse des activités psychologiques de résolution de problème en termes de contraintes, et à partir de cette revue des travaux centrés sur le concept de contrainte, de construire un cadre méthodologique dont la mise à l'épreuve sera faite au cours d'une analyse de protocoles verbaux recueillis auprès d'experts en conception de réseaux informatiques.

Le premier chapitre présente les principaux concepts et travaux de recherche portant sur les modèles de planification. Le second chapitre propose un autre point de vue de l'activité de planification, en terme de gestion de contraintes, et s'inspire en particulier des recherches développées dans le domaine de l'intelligence artificielle dont nous exposons certains résultats et à partir desquels une formalisation du concept de contrainte est proposée dans la perspective de l'analyse des activités cognitives des concepteurs. La partie expérimentale de cette recherche a été conduite auprès de concepteurs de configuration physique de réseaux informatiques; on expose les caractéristiques de cette activité de conception dans le troisième chapitre. La construction de la situation expérimentale et le cadre méthodologique d'analyse sont présentés dans le quatrième chapitre. Les données recueillies sont des protocoles verbaux dont l'interprétation en termes de contraintes fournit des résultats exposés dans le cinquième chapitre. Ces résultats conduisent à envisager pour la suite de cette recherche des approfondissements théoriques et méthodologiques qui sont évoqués dans le dernier chapitre.

1 LES MECANISMES DE PLANIFICATION DANS LA RESOLUTION DE PROBLEMES DE CONCEPTION

Ce chapitre rappelle les principaux concepts développés autour des mécanismes de planification mis en oeuvre dans les activités de résolution de problèmes de conception. Nous nous référons à Hoc (1987) pour évoquer les caractéristiques essentielles des démarches ascendante et descendante impliquées dans le processus de résolution. Le rôle essentiel de la stratégie d'articulation de ces deux démarches dans les situations de résolution de problèmes de conception est ensuite rappelé. Enfin, les travaux qui ont porté sur la modélisation de la planification dans les problèmes de conception sont brièvement décrits.

1.1 La démarche descendante

L'idée est que concevoir et produire un objet, c'est partir de la définition d'un objectif général que l'on décompose en sous-objectifs moins abstraits, eux-même décomposés en sous-objectifs jusqu'à prévoir et réaliser la suite d'actions élémentaires qui aboutira au produit souhaité. Par exemple, Simon (Simon, 1973 cité par Bisserset, 1987), traitant de l'activité de l'architecte, présente la conception d'une maison comme une décomposition descendante de catégories générales, qui va selon lui constituer un programme directeur pour l'architecte: "*House might transform to general floor plan plus structure; structure to support plus roofing plus sheathing plus utilities; utilities to plumbing plus heating system plus electrical system, and so on*". Le concepteur décompose le problème qui lui est soumis en sous-problèmes plus faciles à traiter, ce qui procède d'une stratégie descendante de résolution.

On voit ici que le processus de conception est alors envisagé comme la décomposition du but (dans notre exemple, *construire une maison*) en sous-buts (*plan au sol* et *structure*), combinés entre eux conjonctivement (réaliser le sous-but 1 et le sous-but 2, par exemple: *déterminer la structure au sol tout en déterminant la couverture*, ou de façon pré-conditionnelle (réaliser le sous-but 1 puis le sous-but 2, par exemple: *prendre une décision sur la surface au sol de la maison, puis répartir la surface de chaque pièce d'habitation*). Une particularisation des buts doit être aussi réalisée (Hoc, 1987) afin de passer de l'expression générale de ceux-ci à une expression spécifique à la situation. Le traitement des interférences entre les sous-buts est évidemment crucial et donne lieu à des activités de gestion de contraintes sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

Cette approche descendante (top-down) de l'activité de conception a été constatée dans de multiples domaines. Ainsi, en architecture, on a montré (Lawson, 1978; Lebahar, 1983) que la première représentation d'un problème de construction revêt souvent la forme d'une conjonction de sous-buts, exprimés comme des fonctions spécifiques qui sont traitées

séparément par l'architecte: type d'utilisation du bâtiment, caractéristiques foncières, financières, etc... Lebahar (1983) note que non seulement l'architecte traite habituellement le but général "*maison à construire*" en le décomposant en ces sous-buts, mais que ceux-ci sont généralement regroupés en classes et que des ordres de priorité sont exprimés sur celles-ci. Certaines méthodologies d'analyse de l'activité, employées en général dans des situations de problèmes de transformations d'états, comme par exemple la méthode de Graesser reprise par Sebillotte pour l'analyse de tâches de bureaux (Sebillotte, 1987), permettent de mettre clairement en évidence la hiérarchie de buts et sous-buts impliquée dans une activité de résolution de problèmes.

Toutefois, les résultats d'observations de faits expérimentaux ne sont pas compatibles avec un point de vue strictement et uniquement descendant de l'activité de conception, lequel semble correspondre beaucoup plus à une rationalisation a posteriori de son activité plutôt qu'au processus réel de conception. Ainsi, Visser (1987) donne l'exemple fourni par un ingénieur en mécanique, qui, participant à la conception d'un automate programmable industriel, décrit son activité de telle façon que l'on voit clairement se dessiner une stratégie descendante de résolution: "*construire une représentation fonctionnelle de l'activité, décrire le cycle général, en déterminer la première fonction, décrire la première fonction, ...*". L'auteur montre qu'en fait le concepteur dévie de ce plan hiérarchique quand il est en situation de résolution du problème, puisqu'un même cycle (par exemple, "*déterminer la première fonction*") est traité en plusieurs temps avant d'être achevé. Une modélisation strictement "hiérarchique" de l'activité de conception semble par conséquent plus prescriptive que descriptive (Whitefield, 1987).

On peut aussi penser que le concepteur adopte une démarche descendante dans la planification de son activité dans les phases de conception pour lesquelles il peut exprimer une expertise confirmée (Sebillotte et Bisseret, 1986). En ce cas, l'adoption de la démarche descendante rendrait compte en fait d'une mise en oeuvre de "modules" de connaissances acquis par l'expérience et intervenant à certaines phases de son activité de planification.

1.2 Les modèles dits hiérarchiques

Le développement d'une représentation strictement descendante du processus de conception a été fortement renforcé par un important courant de recherche en intelligence artificielle, dont les Hierarchical Planners sont le paradigme le plus souvent cité, avec l'exemple du système NOAH (pour Nets of Action Hierarchies) de Sacerdoti (1977). Le système propose de considérer le processus de conception comme un cheminement au sein d'une hiérarchie de niveaux d'abstraction où, quel que soit le niveau envisagé, une représentation complète du plan est produite. A chaque niveau du plan, et avant de descendre à un niveau inférieur, des activités de *critique* interviennent, qui permettent de gérer et résoudre les éventuelles contradictions,

interactions, ..., intervenant entre sous-buts. Sacerdoti parle de stratégie *de moindre compromission* (*least commitment strategy*) pour qualifier le fait que les décisions portant sur la solution sont différées le plus longtemps possible. Ceci permet de minimiser les retours en arrière et d'éviter les coûteuses modifications qui doivent alors être faites sur le plan.

Cette modélisation en processus hiérarchiques représente une technique puissante, dont on comprend qu'elle satisfasse les spécialistes de l'intelligence artificielle dès lors qu'on ne cherche pas à modéliser les processus humains de résolution de problème (Bisseret, 1987). En effet, ce point de vue strictement descendant de l'activité de conception n'est psychologiquement pas approprié pour rendre compte d'activités de résolution de problème humaines, comme le confirment les faits expérimentaux dont nous développons les analyses plus loin.

De plus, le terme de *planification hiérarchique* adopté par ce courant de recherche pour qualifier le parti-pris d'une modélisation de la résolution de problèmes fondée sur une démarche descendante du processus de conception a engendré une mésentente conceptuelle qui a souvent donné cours à de vains débats. Ainsi, le concept de planification hiérarchique a souvent été de fait assimilé à l'idée d'une exploitation systématiquement top-down des différents plans possibles pour résoudre le problème. Or, comme on l'a rappelé plus haut, la notion de *hiérarchie* implique simplement un ordonnancement des actions élémentaires en sous-buts, eux-même rattachés à des buts plus généraux, dans des niveaux d'abstraction variables. Quel que soit le caractère du processus de planification que l'on privilégie, descendant ou bien ascendant, on ne peut en tout cas pas se passer de la notion de hiérarchie pour une modélisation des activités de planification lors de la résolution de problèmes de conception.

1.3 La démarche ascendante

Le concepteur met en oeuvre une stratégie ascendante de résolution dans les cas où il s'appuie sur des points de détail du problème posé pour évoquer ou pour élaborer des plans (Hoc, 1987). Des indices sont extraits du problème à traiter et permettent de déclencher des schémas, qui constituent des plans guidant le processus de conception. Dans certains cas, la situation donnée ne permet pas d'évoquer facilement un plan directement relatif au domaine. La disponibilité d'un domaine analogue au premier permet, en utilisant l'analogie, d'y parvenir. La démarche ascendante implique aussi un niveau de contrôle plus ou moins élevé de l'activité. Il s'agit de construire des plans plus généraux par une démarche de généralisation qui relève essentiellement d'une activité d'abstraction.

Cette composante ascendante de l'activité de planification intervient d'une manière essentielle au cours des activités de résolution de problèmes de conception. De nombreuses recherches ont montré comment un plan peut être élaboré à partir de détails servant à organiser la poursuite de

la résolution (Hoc, 1983). Les étapes élémentaires du processus sont déclenchées par des informations que la personne remarque sur l'état actuel de son problème, et qui lui suggèrent des décisions possibles, à quelque niveau que ce soit par rapport à une hiérarchie d'abstraction des buts et sous-buts pour l'ensemble de la tâche. Par exemple, Lebahar (1983) note que les architectes dont il a observé la démarche de conception répètent très souvent que, pour la production de leurs toutes premières esquisses, ils cherchent à trouver "*au moins un bout de problème*".

1.4 Les modèles dits opportunistes

L'émergence de modèles de planification dits *opportunistes* a été essentiellement inspirée par la volonté d'associer cette composante ascendante mise en évidence lors d'observations "en temps réel" d'activités de conception, en l'articulant avec la composante descendante du processus de conception. Cette stratégie d'articulation des deux démarches, observée chez des concepteurs, a été qualifiée par Hayes-Roth et Hayes-Roth (1979) de *comportement opportuniste*. Ces auteurs ont mis à l'épreuve cette hypothèse en réalisant une simulation informatique d'une activité de planification. La tâche soumise aux sujets consistait à planifier l'organisation d'une liste de diverses courses à faire en ville en un temps limité. Les caractéristiques opportunistes du processus de conception ont été mises en évidence à partir d'une analyse des protocoles individuels recueillis. Le modèle de planification élaboré par ces auteurs est fondé sur une modélisation désignée par le terme *blackboard*, dont l'architecture a été largement inspirée par le système Hearsay 2 développé par Erman et al (1975) en intelligence artificielle¹. On trouvera une description très complète de ce modèle dans Nii (1986a; 1986b). Nous en décrivons ici brièvement les grandes lignes.

Ce modèle comporte trois modules: un *tableau* (blackboard), une base d'unités de raisonnement appelées *sources de connaissances* et un *module de contrôle*. Le tableau comprend à tout moment l'état de la solution du problème. Il est donc composé des objets qui sont des éléments de la solution (données d'entrée, solutions partielles, solutions alternatives,...). Ces objets sont organisés hiérarchiquement en différents niveaux d'analyse et définissent en quelque sorte le vocabulaire de l'espace-solution. La fonction du tableau est de gérer les données de l'état-solution. Les relations entre les objets consignés sur le tableau sont gérées par des *sources de connaissances*, dont l'objectif est de donner de l'information pour trouver la solution. Les sources de connaissances sont représentées sous la forme d'ensembles de règles ou assertions logiques. C'est leur action, et elle seule, qui engendre une modification de l'état du tableau. Elles sont responsables de leur propre déclenchement, dans la mesure où elles comportent toutes des pré-conditions stipulant la condition qui doit exister sur le tableau pour qu'elles

¹ Appliqué à la compréhension de la parole, ce système avait pour but de comprendre et répondre à des questions orales en langage naturel posées à une base de résumés d'articles d'informatique.

soient activées. Ainsi, c'est l'état momentané du tableau qui détermine le spécialiste qui doit être mis en oeuvre. Le module de contrôle est composé d'un ensemble de modules, qui détermine le "*focus de l'attention*", mécanisme dont le rôle est de désigner le prochain item qui devra être traité; celui-ci peut être indifféremment une source de connaissance (la prochaine qui doit être activée), les objets du tableau (l'îlot de solution qui doit être traité), ou la combinaison des deux (la connaissance qui doit être appliquée).

On voit par conséquent en quoi les modèles dits opportunistes divergent d'une approche hiérarchique de l'activité: les premiers reposent essentiellement sur l'usage d'une stratégie où l'on n'impose pas d'ordre de mise en oeuvre des modules de connaissances, alors que pour les seconds, cet ordre est déterminé à l'avance. Avoir une vision "opportuniste" de l'activité de conception, c'est adopter l'idée que la production ou la modification de séquences détaillées s'opère par une communication ascendante ou descendante entre les niveaux d'abstraction différents. Ainsi, une décision à un niveau donné d'abstraction peut alors affecter d'autres décisions à n'importe quel niveau, et on peut intervenir dans l'espace de planification à tout moment. Une implémentation informatique de ce modèle, conduite par Hayes-Roth et Hayes-Roth (1979), a permis de procéder à une simulation de la conception d'un emploi du temps. On peut considérer que la similarité des résultats obtenus par cette simulation avec la production d'un sujet étaye la validité psychologique de cette approche de planification.

L'adéquation d'une modélisation en terme de *blackboard* avec l'activité cognitive de résolution de problèmes de conception a par ailleurs trouvé confirmation dans de nombreux travaux (Visser, 1987; Bisseret et al, 1988; Whitefield, 1986a et 1986b). Cette modélisation constitue par conséquent un cadre méthodologique fructueux pour l'analyse d'activités expertes. Par exemple, Visser et Bonnardel (1989), étudiant l'activité de conception d'une antenne de satellite, adoptent le cadre d'une modélisation blackboard pour décrire et articuler les différentes actions (*pas de résolution*) réalisées par des concepteurs. Dans cette recherche, les instanciations des sources de connaissances et les fonctions du module de contrôle, inférées des caractéristiques des raisonnements observés, permettent d'une part de décrire l'organisation générale de l'activité en terme d'évaluation et d'élaboration de solutions, et d'autre part de retracer les stratégies de développement des solutions, ainsi que la structure et l'utilisation des connaissances. Dans le domaine de l'ingénierie mécanique, Whitefield (1986b) rend compte et évalue l'activité des concepteurs en traitant en termes de variables les sources de connaissances impliquées dans l'activité et en comparant les hiérarchies des plans du tableau, ainsi que les modalités de fonctionnement du module de contrôle. L'isolement des sources de connaissance, l'expression et la mise en évidence des plans du tableau et du fonctionnement des modules de connaissance, permettent de décrire l'activité et d'effectuer des comparaisons entre groupes de sujets soumis à différentes modalités de résolution de problèmes. L'auteur extrait des protocoles de séances de conception les sources de connaissances employées par les

concepteurs et, les comptabilisant, montre comment les stratégies diffèrent selon que le concepteur est aidé ou non par un système de dessin assisté par ordinateur. Les sources de connaissances sont considérées ici comme des variables dépendantes, dont la mesure permet une comparaison entre groupes. L'auteur constate que les deux groupes ne se différencient pas par la nature et le contenu des connaissances du domaine que les sujets emploient, quoique les sujets non aidés aient tendance à appliquer plus de connaissances d'évaluation. Les divergences observées se situent sur le plan des connaissances portant sur la pratique du dessin: l'usage d'un système d'aide conduit en fait les utilisateurs à accroître la quantité des connaissances concernant cette pratique, et le contenu de ces connaissances additionnelles est en outre plus complexe et sous-tendu par la technologie.

2 L'ACTIVITE DE PLANIFICATION ENVISAGEE COMME LA GESTION DE CONTRAINTES

La plupart des travaux de modélisation de l'activité de planification ont été jusqu'alors fondés sur la prise en compte des démarches ascendantes et descendantes du processus de conception. Or, la notion de contrainte, si elle a toujours été envisagée comme une composante primordiale des situations de conception, a pourtant peu fait l'objet d'une intégration formelle dans les modèles psychologiques du processus de résolution. Pourtant, comme on l'a fait remarquer plus haut, une lecture des caractéristiques des problèmes de conception faite en ces termes esquisse les lignes d'un modèle psychologique de résolution de problèmes tout à fait plausible. Les observations que nous avons conduites dans le domaine de l'architecture ou dans celui de la conception des réseaux locaux suggèrent que la contrainte est un composant essentiel du processus de conception. En outre, on constate que cette voie de modélisation suscite actuellement beaucoup d'intérêt dans le domaine de l'intelligence artificielle, où de nombreux travaux s'appuient sur l'idée que résoudre un problème, c'est somme toute obtenir qu'un ensemble de contraintes soit satisfait (Montanari, 1974; Rosenfeld et al, 1976; Mackworth, 1977; Davis et Rosenfeld, 1978; Stefik, 1981 a&b; Fox et al, 1982; Manago, 1985; Chandra et Marks, 1986; Descotte et Delesalle, 1986; 1986; Nadel, 1986; Sriram et Maher; Brinkley et al, 1987; Guesguen et al, 1987; Janssen et al, 1989; Mittal et Frayman, 1987; Oplobedu et al, 1989). Cependant, la validité psychologique de ces modèles n'a jusqu'à présent pas été confirmée. Il est par conséquent utile d'entreprendre une réflexion sur cette question.

La première section de ce chapitre expose comment la notion de contrainte a été invoquée par les auteurs pour rendre compte des activités de résolution des problèmes de conception. La seconde section propose, en référence aux travaux qui pour la plupart ont été développés dans le domaine de l'intelligence artificielle, une définition de ce concept en vue d'une modélisation psychologique, tandis que les aspects liés à la gestion des contraintes au cours de la résolution du problème sont présentés dans la troisième section.

2.1 La prise en compte des contraintes dans les problèmes de conception

Une caractéristique commune à toute situation de résolution de problème (quelle que soit la classe du problème que le sujet résoud) consiste en une nécessaire activité de réduction de l'espace de recherche, aussi efficace et pertinente que possible. Un mode de spécification qui va permettre cette réduction progressive du champ des solutions potentielles passe par la définition de contraintes sur l'objet à concevoir. En effet, une contrainte représente une condition à satisfaire pour obtenir le but; elle est donc une description partielle d'un objet, et par conséquent, une description partielle de la solution (Stefik, 1981a). Ainsi, lorsque le concepteur de réseaux locaux décide que les unités professionnelles d'un édifice à câbler doivent être

distribuées par le même câble, il formule une contrainte qui déjà définit en partie la configuration finale du réseau; de même, lorsque ce concepteur adopte l'usage de câbles co-axiaux, il introduit une contrainte sur l'objet qu'il conçoit, puisque la solution devra nécessairement vérifier qu'aucun segment de distribution en câble co-axial ne dépassera les 500 mètres admis par ce type de matériel.

C'est sans doute dans le domaine de l'architecture que, dès les années 1960, on a le plus approfondi les réflexions dans cette voie. Le premier, Alexander (1972, cité par Quintrand, 1985) propose d'analyser le problème architectural en terme d'exigences, de besoins élémentaires, qui doivent être structurés par l'analyse des relations qu'ils entretiennent entre eux. Quand un architecte traduit les contraintes non-spatiales énoncées par le client en contraintes tridimensionnelles, spatiales (Lawson, 1978), ou "spatiales objectives" (Lebahar, 1983) - comme par exemple, le nombre de personnes à loger ou l'exposition de certaines pièces de la maison, il restreint déjà le champ des objets finaux possibles. Le travail principal de l'architecte résiderait alors dans l'énoncé des problèmes (et par conséquent, dans l'énoncé des contraintes). Ainsi, pense-t-on, une plus grande maîtrise de la complexité des problèmes architecturaux serait acquise. De nombreuses applications qui ont été faites de ce principe traitent donc le problème architectural en terme de contraintes. Par exemple, le programme Promet (Maroy, 1971, cité par Quintrand, 1985) permet une décomposition des contraintes du problème sous forme d'un arbre. Les sous-ensembles cherchés sont déterminés par les branches les plus basses de l'arbre, alors que les branches les plus hautes permettent de déterminer trois ou quatre systèmes principaux de contraintes. Cette approche mathématique, aussi attrayante qu'elle paraisse, ne peut bien sûr rendre compte de la totalité de la problématique architecturale car la complexité du processus de conception, si elle prend certes sa source dans les spécifications du problème, dépasse largement un énoncé exhaustif de ces données initiales. En particulier, mais nous reviendrons sur ce point plus loin, on sait que les concepteurs procèdent beaucoup par intégration progressive des contraintes, celles qu'ils découvrent ou bien celles qu'ils n'avaient pas encore prises en compte. C'est sans doute cette activité de gestion des contraintes que ce courant de recherche n'a pas su prendre en compte.

En psychologie, les recherches invoquant le concept de contrainte dans l'activité de conception sont, à notre connaissance, relativement peu nombreuses. Eastman (1970), au cours de l'analyse expérimentale d'un cycle de conception d'une salle de bain, note que les résultats obtenus par les stylistes diffèrent selon que les contraintes inhérentes au problème sont appréhendées au sein de systèmes organisés et structurés, ou bien détectées au hasard. Selon l'auteur, le mode d'organisation des contraintes en mémoire, l'efficacité des systèmes opérationnels édifiés par l'expérience préalable ou établis au cours du processus de conception, marquent fondamentalement les solutions adoptées.

Le modèle blackboard développé par Hayes-Roth et Hayes-Roth (1979) ne précise pas, quant à lui, le statut de la contrainte dans la démarche opportuniste du concepteur. En fait, il ne précise pas l'intervention d'opérateurs explicites traitant les contraintes; ces dernières sont mélangées aux données initiales, et elles sont tacitement considérées comme étant exprimées en totalité au cours de l'énoncé du problème.

Simon (1969, cité par Stefik, 1981a) propose d'interpréter en termes de contraintes les interactions existant entre les divers sous-problèmes issus du problème traité. Les modélisations "hiérarchiques" introduisent cette idée de manière sous-jacente par l'utilisation du concept de *critique* développé par Sacerdoti. Ces *critiques*, employées par exemple dans le système ABSTRIPS (Sacerdoti, 1974), constituent un ensemble de procédures dont le rôle est de contrôler les effets des actions qui pourraient mettre en danger la réussite du plan. Ainsi, elles sont utilisées pour détecter et corriger les interactions, éliminer les opérations redondantes, etc; la *critique* peut donc être vue comme une activité d'évaluation dont l'issue oriente la résolution. Or tout processus de satisfaction de contraintes renvoie directement à l'activité d'évaluation du concepteur sur les solutions intermédiaires qu'il produit. Ceci lui confère une parenté étroite avec la notion de *critique* que nous venons d'exposer.

Cette intervention cruciale au cours du processus de conception de connaissances de type évaluation qui permettent de comparer les objets admissibles entre eux ou d'évaluer la qualité d'une solution selon les contraintes proposées conduit à penser qu'il est nécessaire de chercher à rendre compte, dans un modèle psychologique de l'activité de conception, du fait que le concepteur est toujours à la recherche d'un compromis entre tous les critères relatifs à l'objet-solution possible. Nous disons "compromis", parce qu'il semble impossible de résoudre un problème de conception de telle sorte que toutes les contraintes définies soient également satisfaites. On l'a déjà noté: les conflits entre contraintes sont la source d'une activité de planification par laquelle le concepteur doit s'efforcer de satisfaire chacune au mieux. Nécessairement, des priorités s'établissent au cours de ce processus, là où il est jugé par le concepteur (sur la base de son expérience ou bien en fonction du cas traité), que certaines des contraintes posées doivent être satisfaites en premier lieu. L'état final, dont on peut penser qu'il constitue pour le concepteur concerné un optimum entre toutes les contraintes, n'est pas le seul admissible: un autre expert aurait certainement constitué un ordre différent sur les contraintes, et la solution finale au même problème initial aurait été une des n solutions existantes satisfaisant l'ensemble des contraintes posées.

Ceci donne souvent le sentiment que le propre des contraintes dans les situations de conception est qu'elles sont presque toujours flexibles et négociables, puisque jusqu'au dernier moment, on peut modifier, du moins en partie, l'ordre d'importance qu'on leur assigne dans la réalisation du projet. Très souvent d'ailleurs, les concepteurs évoquent eux-même ce point, en

rappelant que le poids d'une même contrainte change selon le projet traité, mais aussi selon les données prises en compte en amont de la résolution. S'il est possible aux concepteurs de dresser une liste de contraintes, il leur est en général impossible de la hiérarchiser. Les précisions que l'on peut apporter au concept de contrainte, quand on s'entretient avec des concepteurs, conduisent en général à discerner celles qu'ils nomment "non contournables" des contraintes dites "contournables".

Les contraintes "non contournables" sont généralement décrites par les concepteurs comme étant les données initiales du problème (par exemple, le nombre de machines à connecter sur un réseau, ou la surface du terrain sur lequel l'architecte bâtit la maison) ainsi que les astreintes liées aux conditions de validité techniques de l'objet (par exemple, le nombre de câbles admis par un Répéteur Multiport, qui est une boîte de connexion inter-réseaux).

Les contraintes sont dites "contournables" lorsqu'on sait qu'elles peuvent être intégrées à la conception avec une grande souplesse, car elles peuvent être satisfaites de plusieurs façons et à des degrés variables. On définit autrement ces contraintes-là comme celles qui permettent de répondre à un compromis à faire entre plusieurs choix possibles. Ainsi, même si ceci n'est pas explicitement spécifié par le client, le concepteur d'un réseau informatique s'imposera généralement la contrainte budgétaire "le coût doit être raisonnable". Cette contrainte sera vue comme une contrainte "contournable", parce que dans ce cas, une certaine latitude est laissée quant aux modalités d'application de cette contrainte: selon les choix qui auront été faits sur d'autres aspects de la construction et les priorités qui auront été accordées par ailleurs, un coût "raisonnable" peut varier dans un intervalle de prix souvent étendu. C'est l'application de cette contrainte qui permettra à l'expert de choisir parmi plusieurs solutions toutes valides. Il faut cependant noter que dans certaines situations, la contrainte budgétaire peut être vue comme une contrainte "non contournable", par exemple lorsque le cahier des charges en spécifie très précisément les limites.

Ainsi, on voit que le concept de contrainte est couramment invoqué pour rendre compte des processus de conception. Mais sa définition reste ou bien intuitive, ou bien soumise à une interprétation restreinte. Les formulations de "contraintes" ne sont-elles pas simplement, et seulement, les spécifications du problème, comme le suggère Alexander en architecture? On pourrait alors assimiler, comme le font Hayes-Roth et Hayes-Roth les notions de *contrainte*, *spécification*, avec *donnée* et supposer que l'intégration de ce composant dans la résolution du problème serait une simple prise en compte de sa valeur au moment où elle est découverte par le concepteur. En ce cas, doit-on envisager son insertion dans le processus comme une opération simple, dont les conséquences sur l'ensemble du plan élaboré resteraient locales, ou bien doit-on imputer à ce mécanisme une complexité dont il faudrait alors évaluer l'ampleur? La contrainte serait alors interprétée comme un ensemble d'éléments organisés en une structure

particulière, comme le suggère Eastman, dont la configuration marquerait fondamentalement le résultat final. Serait-il alors possible de déceler dans ces structures des "patrons" de représentations schématiques? Ou bien doit-on considérer que la contrainte est une activité d'évaluation, de critique sur la solution produite, et proposer une définition du concept proche des travaux de Sacerdoti, en cherchant alors les conditions de sa mise en oeuvre ?

Au-delà du statut que l'on peut conférer à ce concept, on doit étudier comment ces composantes nommées *contraintes* s'intègrent dans le cours du processus de conception. Ceci se rapporte directement à une réflexion sur les mécanismes de planification: une contrainte agit-elle simplement par la formulation de ses termes? Suffit-il, pour qu'elles s'exécutent, d'énoncer les contraintes au moment où on veut les faire intervenir dans le processus? Ou bien doit-on penser que l'ensemble des contraintes doit être établi préalablement à l'établissement de la solution? Est-il plus judicieux de distinguer des phases distinctes de formulation des contraintes, puis de leur propagation et enfin de leur satisfaction? Enfin, quelles limites doit-on poser à une interprétation du processus de conception en terme de gestion de contraintes, et comment peut-on envisager l'articulation d'un tel concept avec les démarches ascendante et descendante de planification?

Réfléchir aux principes psychologiques qui sous-tendent la notion de contrainte, c'est tout d'abord en formuler une définition plus précise. Mais il faut également en cerner les propriétés et décrire leur mise en oeuvre au sein du processus de conception. Les deux sections qui suivent portent sur l'un et l'autre de ces aspects.

2.2 Définir la notion de contrainte

Dès lors qu'on pense à définir d'une manière rigoureuse, et surtout opérationnelle, le concept de contrainte, on a quelque difficulté à ne pas tomber dans une confusion entre ce qui relève des spécifications, ce qu'on nomme des données, et ce qui paraît être des ... contraintes! Aussi, on propose dans cette section de considérer la formalisation du concept de contrainte développée dans le domaine des mathématiques appliquées, puis reprise en intelligence artificielle pour la résolution de problèmes de planification et d'organisation de tâches (Fox et al, 1982; Descotte et Latombe, 1985; Descotte et Delesalle, 1986), d'aménagements spatiaux (Manago, 1985), ou autres domaines de conception (Stefik, 1981; Sriram et Maher, 1986; Mittal et Frayman, 1987; Berlandier, 1988; Janssen et al, 1989). On trouvera chez Mackworth (1987) une introduction théorique et une synthèse des travaux majeurs effectués dans cette direction.

2.2.1 Définition opérationnelle

Une contrainte peut être formalisée comme un prédicat décrivant une relation entre des variables, variables dont la particularisation est faite ultérieurement dans un domaine pré-défini. Par exemple, dans le domaine de la génétique, Stefik (1981) définit une contrainte:

Contient

qui est un prédicat liant les variables:

Type de Gène / Structure d'ADN

dont une instanciation possible pourrait être:

Contient (Gène-(Tc) / ADN-(13))

(Tc) et (13) étant des particularisations de chacune de ces variables.

Une première idée fondamentale ici est qu'une contrainte devient une combinaison de valeurs, et que cette combinaison n'est pas unique. En effet, il existe de multiples possibilités d'instancier le prédicat-contrainte, ce qui permet d'accepter plusieurs solutions au problème posé. Ainsi, pour cet exemple, on peut supposer que l'instanciation du prédicat *Contient* pourrait trouver, pour les deux variables qu'il met en relation, d'autres valeurs admissibles que "Tc" pour le type de gène associé à "13" pour la structure d'ADN.

Un autre exemple issu du domaine de la conception de réseaux informatiques est donné par un expert décrivant son activité:

"... à chaque étage qu'il faut câbler, on peut placer un segment de base qui serait en gros câble Ethernet, et qui parcourrait le couloir, *et au niveau distance, a priori aucun problème, puisque ces gros câbles peuvent faire 500 mètres*".

On a bien ici l'expression d'une relation entre le câble choisi, dont chaque type admet une longueur maximum donnée, et la distance à câbler. On peut définir ici une contrainte qu'on nommerait par exemple "*Longueur-Compatible*", liant les deux variables: *Type-de-Câble/Longueur-du-Segment*. Pour ces variables, on sait (par l'analyse de l'activité) que les domaines de valeurs qui leur sont associés sont respectivement:

- *Type-de-Câble (de degré 3)¹ {thin, thick, fibre optique}*
- *Intervalles-de-Longueurs-de-Segment (de degré 3) {0-185, 185-500, 500-3000}*

Les instanciations possibles de cette contrainte font partie du domaine suivant:

¹ Le degré d'une variable rend compte de la cardinalité de son domaine.

	Type de câble	thin	thick	fibre optique
Longueur des segments (en m)	0 à 185	X	X	X
	185 à 500		X	X
	500 à 3000			X

Une contrainte est alors définie comme un sous-ensemble du produit cartésien des domaines de valeur associés à chacune des variables liées à cette contrainte, ce sous-ensemble définissant la contrainte "*Longueur-Compatible*" dont les instances sont désignées sur le tableau par les X; cette contrainte a par conséquent six instances possibles.

Une contrainte est unaire, binaire ou n-aire, selon le nombre de variables qu'elle met en relation. Dans notre exemple, la contrainte citée est binaire, mais on verra dans la section suivante que les contraintes unaires (par exemple, *la surface du terrain est de 450 m*) apparaissent fréquemment au cours d'une situation de conception.

La conséquence essentielle d'une telle définition est qu'une solution est le produit d'une instantiation des variables effectuée de telle sorte que toutes les contraintes énoncées ont été satisfaites. Selon les instantiations qu'on a faites pour chacune des variables, plusieurs solutions sont alors souvent possibles pour un même problème. Or cette conclusion s'accorde parfaitement avec les observations psychologiques réalisées auprès de concepteurs, qui ont mis en évidence qu'une des caractéristiques des problèmes de conception est la construction de solutions multiples à partir d'un problème initial identique. Il semble donc tout à fait pertinent de modéliser un problème de conception comme un problème de satisfaction de contraintes. Ce faisant, on rendrait effectivement compte de la variété des solutions admises dans ces situations.

2.2.2 Contraintes prescrites et Contraintes déduites

Du point de vue psychologique, il paraît nécessaire de marquer une distinction entre deux sortes de contraintes: d'une part, des contraintes dont l'instanciation est soumise aux décisions du concepteur et dont les valeurs peuvent par conséquent varier d'un expert à l'autre, et d'autre part, des contraintes qui sont déjà instanciées, c'est-à-dire dont les valeurs des variables sont fixées préalablement à la résolution du problème. Cette distinction conduit à créer deux types de contraintes, qu'on nommera (selon une terminologie proposée par Bonnardel, 1989), *Contraintes prescrites* pour les unes et *Contraintes déduites* pour les autres. On en précise maintenant les définitions.

Contraintes prescrites

On appellera *Contrainte prescrite* toute contrainte préalablement instanciée. Il s'agit par conséquent de toute unité d'expression qui décrit une relation entre variables - ou bien un prédicat attaché à une variable, dont la valeur est déterminée par avance, avant même que la résolution du problème ne soit commencée. Ces contraintes revêtent un caractère spécifique aux yeux des concepteurs, parce qu'il est tenu de se plier aux exigences imposées par elles, et c'est pourquoi il les qualifie souvent d'incontournables. Par exemple, "*le bâtiment a trois étages*", "*la surface du terrain est de 450 m²*", "*le prix ne doit pas dépasser cent mille francs*" sont des contraintes qui seront classées dans la catégorie *Contraintes prescrites*.

Contraintes déduites

Une unité de contenu de la catégorie *Contraintes déduites* est caractérisée dans le protocole d'un sujet par toute relation associant des variables non préalablement instanciées. On a précisé, dans la mesure où cela a été exprimé, ces variables et leurs degrés. Un exemple de cette catégorie est la contrainte "*Longueur-Compatible*" que l'on a détaillée plus haut.

2.2.3 Contraintes de préférence et contraintes de validité

La nécessité de différencier la nature des contraintes manipulées par les concepteurs a été empiriquement établie par de récents travaux développés en intelligence artificielle (Descotte et Latombe, 1985; Janssen et al, 1989), afin de rendre compte des choix liés à l'expertise individuelle des concepteurs, qui conduisent ceux-ci à adopter, au sein de l'ensemble des solutions possibles (et toutes également valides), telle solution plutôt que telle autre. On observe en effet que les concepteurs privilégient très vite quelques-unes des différentes solutions d'un problème. Ce choix, qui répond à l'idée que certaines des solutions satisfont "mieux" que d'autres les multiples spécifications énoncées, est fondé sur des critères de préférence. Ceux-ci peuvent être compris comme des contraintes auxquelles le concepteur se conforme et qu'il lui paraît souhaitable de satisfaire. On retrouve ici l'idée, introduite en §2.1, qu'il existe des contraintes de natures différentes, celles qui doivent être obligatoirement réalisées pour que l'objet conçu soit correct et celles dont il est souhaitable mais non nécessaires qu'elles se réalisent.

Pour rendre compte des différences établies entre la nature des contraintes posées, on peut, à l'instar de Descotte et Latombe (1985) ou Janssen et al (1989), introduire une distinction entre deux types de contraintes: d'une part des contraintes de validité, qui doivent être obligatoirement vérifiées par les objets, et qui permettent alors de créer des objets admissibles

(par exemple, un câble *Thick* ne peut être le support d'un segment de réseau supérieur à 500 mètres); et d'autre part, des contraintes de préférence, qui rendent compte du fait que les objets admissibles ne sont pas équivalents au vu de critères d'évaluation de sources très diverses (par exemple, le coût de la solution, sa robustesse, etc). On ne peut cependant pas toujours aisément distinguer ces deux natures de contraintes, car ce qui peut paraître une préférence pour tel expert peut être vu comme une condition de validité par tel autre. Cette limite fluctuante entre contrainte de préférence et contrainte de validité est liée d'une part à l'expertise des concepteurs: certaines contraintes peuvent paraître obligatoires à certains et simplement souhaitables à d'autres; d'autre part, cette frontière est dépendante du contexte de la situation de conception, selon les spécifications qui sont données initialement (le cahier des charges peut par exemple imposer le regroupement des unités professionnelles sur le même réseau; ceci devient alors une contrainte de validité). Toutefois, on sait que, quelle que soit la situation de conception et le domaine de connaissances qui lui est assujéti, il existe un ensemble de contraintes qui doivent être obligatoirement respectées pour que l'objet conçu soit valide. Par exemple, un réseau informatique dont un des câbles *Thin* serait prévu pour couvrir une distance supérieure à 185 mètres ne serait pas une solution admissible; ne serait pas non plus valide un réseau informatique dont le coût dépasserait le budget imposé par le client. Ainsi, une contrainte est dite contrainte de validité quand l'objet conçu doit obligatoirement en respecter les prescriptions.

Tout autre contrainte sera définie comme une contrainte de préférence. Que leurs termes soient respectés ou non par le concepteur, l'objet conçu restera malgré tout un objet admissible au vu des critères de validité. Il est important de remarquer que bien que les termes des contraintes de préférence ne doivent pas nécessairement être vérifiés par la solution pour que celle-ci soit correcte, le choix des concepteurs d'adopter telle solution plutôt que telle autre, toutes deux correctes du point de vue des critères de validité, est guidé par la présence ou l'absence des critères de préférence. Par exemple, les experts en réseaux informatiques préfèrent choisir entre plusieurs solutions toutes également valides une configuration de réseau qui respecte le regroupement des unités professionnelles sur un même câble (dans les cas où cette condition n'est pas explicitement et formellement exprimée par le client).

2.3 La gestion des contraintes dans le cours du processus de planification

L'intégration de contraintes dans la démarche de résolution ne peut cependant se réduire à la simple définition de leurs termes. Plus précisément, c'est leur incorporation progressive dans le cours du processus de planification, et donc la façon de procéder aux choix d'instanciation des variables mises en jeu, qui paraît fondamentale. Cette dialectique opérant entre la génération de solutions possibles et la découverte d'opérations de contraintes sur l'espace-solution ((Henrion, 1978; Akin, 1978) cités par Whitefield, 1989) conduit à considérer la planification du processus

comme l'issue, non seulement de la formulation des multiples contraintes portant sur le projet, mais surtout de la gestion de leur intégration. C'est d'ailleurs l'analyse que fait Lebahar (1983) de l'activité de conception architecturale, quand il observe que la stratégie de l'architecte est de ne pas introduire trop tôt des contraintes relatives à son projet qui le conduiraient à faire des choix prématurés dont le coût de la remise en question serait trop élevé. Lebahar suggère alors de comprendre l'activité de conception comme un processus de réduction progressive de cette incertitude qui pèse sur la représentation de l'objet. C'est l'intégration graduelle des contraintes adéquates qui conduirait à cette réduction.

Cette idée d'une dialectique s'effectuant entre la définition des multiples contraintes portant sur le problème d'une part, et leur gestion tout au long du problème d'autre part, est appliquée par Stefik (1981a et 1981b) dans une simulation informatique de l'activité de conception de plans de clonage de gènes. L'auteur, à la suite de Simon, considère que les contraintes représentent les interactions entre les problèmes et sous-problèmes. La puissance du modèle proposé par Stefik réside dans la possibilité de définir très tardivement les objets, et ceci non pas d'une manière uniquement descendante, mais aussi ascendante. Ainsi, la gestion progressive des contraintes est assurée puisque l'introduction de nouvelles contraintes peut d'une part modifier la spécification des objets définis dans des phases antérieures et peut d'autre part générer l'introduction et la propagation de nouvelles contraintes.

C'est également sur le principe d'une introduction incrémentale des contraintes que repose le système décrit par Janssen et al (1989), traitant de la situation de conception de plans de synthèse peptidique. Le fonctionnement prévu pour ce système est fondé sur son caractère interactif, pour lequel le contrôle de la recherche sera laissé à l'utilisateur, qui aura la possibilité de retrancher ou d'ajouter des contraintes de préférence. Le système consistera à vérifier si l'ensemble courant de contraintes peut être satisfait et assister l'utilisateur dans ses choix. Initialement, seules les contraintes de validité seront acquises; ainsi, l'énoncé du problème correspondra à la faisabilité chimique du plan. L'utilisateur aura alors la possibilité d'exprimer par étapes successives les caractéristiques des plans recherchés en modifiant l'ensemble des contraintes de préférence à satisfaire. Cet ensemble définit à chaque étape la qualité des plans encore possibles. L'arrêt de la recherche interviendra lorsque l'expert jugera cette qualité satisfaisante. Le système énumèrera alors l'ensemble des solutions; une interface graphique permettra la consultation de l'état courant de la recherche, notamment en fournissant l'ensemble des valeurs encore possibles pour une variable. Cette interface permettra également à l'utilisateur d'ajouter ou de relaxer des contraintes, ce qui améliorera la compatibilité de l'outil avec le comportement d'un concepteur.

L'introduction incrémentale de contraintes paraît extrêmement prometteuse pour une meilleure adéquation des aides logicielles aux processus psychologiques. Dans les systèmes que l'on

vient de décrire, cette gestion très souple des contraintes est opérée par leur *formulation*, leur *propagation* et leur *satisfaction* dont on donne ici une interprétation cognitive.

La formulation d'une contrainte est détectée par l'énoncé de ses termes et consiste à déterminer les valeurs des variables qui lui sont associées. Par exemple, l'énoncé suivant (i): "*selon la taille du bâtiment, on mettrait des routeurs plus ou moins grands*" formule clairement une relation qui contraint la variable "*capacité des routeurs*" en fonction de l'autre variable "*taille du bâtiment*".

La propagation d'une contrainte consiste, à partir de contraintes établies d'en établir de nouvelles. Au-delà des aspects de propagation explicite des contraintes, il est certain qu'intervient aussi dans le cheminement de résolution des concepteurs un mécanisme de propagation implicite des contraintes; les caractéristiques de ce mécanisme ne seront pas étudiés ici.

La satisfaction d'une contrainte est un terme générique qui désigne toute décision adoptée à la suite de la formulation d'une contrainte (qu'elle en satisfasse les termes ou pas). La satisfaction d'une contrainte est parfois immédiatement consécutive à la formulation d'une contrainte (ii) "*je ne mettrais pas un MacLayerBridge, car cela, je l'aurais utilisé si j'avais un seul câble de manière à pouvoir redisposer un câble en fibre optique, parce que la longueur est assez importante*", parfois différée - c'est ce qu'on a observé pour la contrainte (iii) - et elle est même parfois absente du protocole.

2.4 Conclusion

La formalisation que l'on a exposée rend compte du caractère déclaratif de la notion de contrainte où celle-ci est envisagée comme une représentation mentale. On a montré qu'une contrainte peut être vue comme une relation entre des variables, le rôle du concepteur étant dans un premier temps de déterminer l'ensemble des valeurs de ces variables de telle sorte que la relation considérée soit satisfaite. Mais on doit aussi s'intéresser à l'aspect procédural de la contrainte pour rendre compte du fait que le concepteur doit employer son expertise à formuler, propager et satisfaire les contraintes liées au problème, compte tenu des inévitables conflits émergeant entre elles. Ces processus de gestion des contraintes au sein du processus de conception sont directement liés aux savoir-faire des concepteurs et donc aux traitements qu'ils mettent en oeuvre et doivent être étudiés complémentirement aux aspects déclaratifs que l'on a évoqués plus haut.

A partir de cette base théorique, on a construit un cadre méthodologique pour l'analyse des processus de résolution de problèmes de conception en terme de gestion de contraintes. Cette analyse a été conduite dans une situation de conception de réseaux informatiques, que l'on expose au chapitre suivant.

3 L'ACTIVITE DE CONCEPTION DE CONFIGURATION DE RESEAUX INFORMATIQUES

La configuration physique de réseaux informatiques est une activité de conception dont on a déjà évoqué quelques caractéristiques (§ Introduction). Une étude de l'activité a été faite (Darses et Falzon, 1989; Darses, 1989). On en décrit les aspects essentiels dans ce chapitre.

3.1 Le domaine

Un réseau informatique constitue la colonne vertébrale du complexe de transmission et de traitement de l'information qui permet aux ordinateurs de dialoguer entre eux. Selon la société considérée ou le service concerné, les données échangées sont de diverses natures: images, textes, graphiques, ... On s'est intéressé ici à la conception de réseaux locaux¹.

La conception totale d'un réseau local requiert trois types d'expertise. Les experts en configuration logique de réseau résolvent les problèmes de réglage des débits de messages, de vitesse de communication, de filtrage des données, des cas d'incompatibilité entre protocoles, etc. Un second domaine d'expertise est dédié à la conception de la configuration physique de réseaux locaux. Les experts doivent prendre des décisions sur les supports physiques à adopter, sur le matériel de connexion entre réseaux, etc. Enfin, des spécialistes de l'installation technique des réseaux interviennent afin de mettre en place câbles et boîtes de connexion et pour procéder aux tests de performance. Les expertises sont donc de natures différentes et complémentaires. Ceci explique qu'un même problème ne sollicite pas systématiquement l'intervention des trois catégories d'experts, et que si c'est le cas, elle s'opère d'une manière séquentielle plutôt qu'interactive. Les experts dont nous avons observé l'activité sont responsables du traitement des problèmes de configuration physique des réseaux. Ils interviennent dans deux situations: quand une configuration initiale doit être créée (les ordinateurs ne sont pas encore connectés entre eux dans l'édifice), ou bien dans le cas d'une configuration incrémentale (le réseau existant ne suffit plus aux besoins).

3.2 Les données initiales

Les données initiales que manipulent les experts sont de trois ordres: d'abord, un cahier des charges (plus ou moins précis selon l'état d'avancement du projet considéré); puis des

¹ Dits "LAN", pour Large Area Network, par opposition aux réseaux longues distances (dits WAN, pour Wide Area Network) qui, eux, empruntent les infrastructures de télécommunication existantes, dont la difficulté majeure réside dans la mise au point des modalités de transmission et d'interconnexion des données numériques et logiques. Contrairement aux WAN, les réseaux locaux sont circonscrits dans un site et ne dépendent donc pas des supports de transmission extérieurs. Une introduction à ces nouvelles technologies est présentée par Dubois & al (1988).

informations topographiques, liées aux caractéristiques de l'édifice à câbler; enfin, des choix technologiques qui dépendent du matériel utilisé dans la conception du réseau. Comme dans toutes les situations de conception, il est notable de constater que ces données initiales, présentées comme des spécifications plus ou moins précises de l'objet final, peuvent être interprétées en terme de contraintes.

3.2.1 Cahier des charges

Les experts doivent prendre en compte des spécifications incluses dans le cahier des charges ou parfois seulement exprimées au cours d'entretiens avec le client. Ce sont à la fois des données qualitatives et quantitatives qui sont précisées à propos de la solution. L'environnement électromagnétique doit être connu, la nécessité de filtrer les transmissions entre unités de travail doit être déterminée, ainsi que le nombre et les types de machines à connecter; le besoin d'une extensibilité future du réseau doit être ou non exprimé, etc. Il faut savoir que ces spécifications sont rarement délivrées dans leur ensemble et d'une manière complètement précisée lors du premier entretien avec le client. Les grandes lignes du projet initialement tracées constituent des exigences relativement souples: des discussions ultérieures avec l'expert peuvent amener parfois à les modifier d'une façon importante.

3.2.2 Données topographiques

Le rôle des informations fournies par le plan de l'édifice est fondamental dans la spécification du problème à traiter. Les indications qu'il recèle sont extraites avec beaucoup de soin par les experts et sont de natures très diverses. La configuration générale du bâtiment, la taille et la disposition des bureaux, l'emplacement des machines à connecter (et donc leur densité en certains endroits du bâtiment) , etc...sont bien sûr déterminés, mais des informations plus complexes sont aussi traitées à partir de ces documents, comme l'emplacement probable des passages de câbles (à partir de la localisation des gaines techniques, ou ascenseurs, ou encore de la configuration des couloirs).

3.2.3 Matériel

Une difficulté importante de la conception de réseau réside dans le fait que le matériel technologique est en constante évolution. Il en résulte que les solutions conçues un jour peuvent devenir inadéquates, sinon inadmissibles, le lendemain. Cet aspect de la conception de réseaux ne doit pas être négligé car les contraintes liées à ces propriétés technologiques étant très changeantes, elles ne peuvent que dans une certaine mesure être intégrées par l'expert au sein de procédures d'exécution. Le matériel technique "de base" que doivent utiliser les experts consiste en câbles (en fibre optique, en câbles coaxiaux ou paires torsadées - nommés Thick ou Thin) et

connecteurs dont les propriétés logiques varient (Répéteurs pour l'amplification simple du signal; Multi Port Répéteur (MPR) pour la création de sous-réseaux; Mac Layer Bridge, Gateway, Router pour filtrage et adressage des messages, etc...). Les propriétés de chacun de ces objets peuvent être bien déterminées par une lecture attentive des documentations techniques ou par entretiens avec les experts. Ces choix technologiques constituent des descriptions partielles des solutions, que celles-ci soient intermédiaires ou finales.

3.3 Description de l'activité

On expose ici quelques particularités de l'activité de conception de configuration physique de réseaux, qui ont été observées au cours d'interviews, d'analyse de cas passés et d'observations sur le terrain. On pourra ainsi saisir l'originalité de cette activité par comparaison à d'autres situations de conception.

3.3.1 Multiples cycles de conception

Comme dans le domaine de l'architecture, on observe que l'objet à concevoir est spécifié progressivement au cours de multiples cycles de conception par des interactions nombreuses entre le client et le concepteur. Les premières entrevues avec le client permettent de circonscrire le problème à résoudre de telle sorte qu'un devis soit établi. Ce premier cycle de conception consiste en général pour les experts à saisir la particularité du problème posé (le bâtiment a une architecture particulière, ou bien les machines sur place sont déjà partiellement connectées sur des petits réseaux type Appletalk, ou encore le budget est très faible, ou bien les applications attendues sont importantes, etc...). C'est seulement dans un second temps que les spécifications vont être précisées et complétées. Ces nouvelles indications peuvent amener le concepteur à modifier fondamentalement la solution proposée dans le devis. On assiste de la sorte à une évolution du projet sur trois, voire même quatre cycles de conception, pour l'obtention de la solution finale. On considère que chacun des cycles donne lieu à l'ensemble d'un processus de conception. Dans cette étude, on analysera l'activité de conception au cours du premier cycle de conception.

3.3.2 Méthode de conception

Comme en architecture, on trouve dans l'activité de conception de réseaux un certain nombre de principes que les experts appliquent pour concevoir l'objet. Par exemple, la nécessité de procéder à une architecture hiérarchique du câblage (une distribution par un "backbone" vertical, puis par un "backbone" par étage, puis des câbles "end-user" qui desservent les utilisateurs) est un principe auquel les experts se conforment souvent, du fait de leur formation. Mais ces principes sont, soit trop locaux (et ils s'apparentent alors plus à des procédures

d'exécution), soit trop généraux (et ce sont alors plutôt des indications méthodologiques), pour être assimilés à des méthodes de résolution. La marge de choix dépendants du concepteur est étendue et conduit à la production de solutions très diversifiées.

3.3.3 Le dessin comme support de la conception

Dans certains domaines, comme l'architecture, le dessin est non seulement un support de la conception, mais aussi une représentation cognitive de l'objet à concevoir. Dans le domaine de la configuration des réseaux locaux, le rôle de l'outil graphique est en revanche réduit à une simple expression des solutions évoquées; il est plutôt un support pour représenter schématiquement l'objet conçu, comme dans le domaine de l'électronique par exemple. L'analyse des traces graphiques n'est par conséquent pas mise en premier plan dans cette étude.

3.3.4 Conception individuelle et collective

Une caractéristique notable de l'activité de conception de réseaux locaux est que le traitement d'un problème se fait en général en deux temps: tout d'abord, une phase de résolution individuelle, au cours de laquelle un des experts propose une solution au problème traité. Puis une seconde phase de résolution collective plus informelle, où les décisions prises sont évaluées et éventuellement modifiées par des discussions avec un autre expert. Dans cette étude, on ne prend pas en compte l'aspect interactif de l'activité.

3.3.5 Conclusion

Les concepteurs de réseaux locaux saisissent un état initial du problème exprimé en termes de choix de matériel technologique, de spécifications du cahier des charges et de données topographiques. Le caractère flou, mal précisé, souvent considéré comme un attribut des problèmes de conception, est bien confirmé, puisqu'on a vu que cet état initial est progressivement spécifié au cours des successives interactions avec le client. On a vu qu'il n'y a pas de démarches ou méthodes formelles qui peuvent guider l'expert de l'état initial de son problème jusqu'à l'état final; si certaines procédures d'exécution existent, on sait toutefois que l'essentiel de l'activité du concepteur réside dans l'élaboration de stratégies adéquates pour la résolution du problème à traiter. L'état final conserve certes une certaine uniformité par comparaison à d'autres domaines de conception (l'architecture par exemple), mais cependant les solutions proposées diffèrent selon les concepteurs.

4 SITUATION EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIE D'ANALYSE

On a conduit une expérimentation dans le domaine de la conception de réseaux informatiques afin d'évaluer comment l'activité de configuration de réseaux informatiques peut être comprise en terme de gestion de contraintes. La construction de cette expérimentation est décrite dans la première section de ce chapitre. Les données recueillies à l'issue de cette phase expérimentale sont essentiellement des protocoles verbaux. L'interprétation des raisonnements de conception sous l'angle de gestion de contraintes a nécessité de mettre au point des descripteurs de ces protocoles verbaux. La méthodologie mise en oeuvre dans cette perspective est exposée dans la seconde section du chapitre. Puis on présente les hypothèses que l'on a formulées à propos de la gestion des contraintes au cours du cheminement de conception dans la dernière section du chapitre.

4.1 Construction de l'expérience

4.1.1 Une situation réaliste et un problème de référence

L'analyse de l'activité que l'a exposée plus haut a permis de construire une situation expérimentale réaliste. On s'est inspiré de la configuration d'un réseau existant (étudiée hors du cadre professionnel concerné) pour spécifier une situation de premier cycle de conception¹. Disposer ainsi d'un même problème de référence autorise une comparaison des processus de raisonnement des experts. On trouvera en annexe les données du problème.

4.1.2 Une comparaison des niveaux d'expertise

Le recueil de protocoles d'experts de différents niveaux d'expertise permet d'accéder à une meilleure compréhension des processus de résolution, en mettant en évidence non seulement les différences de contenu des connaissances manipulées, mais aussi en indiquant la manière dont celles-ci sont employées. Nous analyserons les protocoles de six des sujets qui ont participé à l'expérience. L'estimation des niveaux d'expertise a été faite en fonction des critères suivants:

- le niveau novice est attribué aux sujets qui appartiennent à d'autres unités professionnelles (département vente, département recherche) mais qui ont cependant certaines connaissances à propos de la configuration physique de réseau;
- le niveau expert qualifie les personnes qui traitent habituellement les problèmes de configuration physique des réseaux.

¹ Dans la plupart des domaines, la conception d'un projet se fait en plusieurs étapes, ponctuées par des entrevues avec le client, dont l'issue est parfois source de modifications notoires des solutions envisagées. La première étape de conception est réalisée en général en vue d'un appel d'offres. Même si le niveau atteint dans la solution reste peu détaillé, on constate qu'un cycle entier de conception est traversé, d'un état initial à un état final.

4.1.3 Méthode d'information à la demande

Les sujets sont placés dans une situation d'information à la demande, où aucune indication sur le problème qui n'ait été explicitement demandée par le sujet ne lui est fournie. Ainsi, on peut connaître quelles sont les données initiales qu'un concepteur prend en compte pour résoudre son problème, leur nature, leur ordre de saisie, leur nombre, etc. Ces données initiales ont été définies comme des contraintes prescrites (voir § 2.2.2); ainsi, par la méthode d'information à la demande, on obtient déjà une liste de certaines des contraintes prises en compte par les concepteurs.

4.1.4 Procédure expérimentale

La consigne expose aux sujets le principe d'information à la demande et leur précise qu'il faut autant que possible "penser à voix haute". On définit l'objectif de la résolution comme la réponse à un appel d'offres: l'expert doit considérer que sa résolution est terminée quand il pense que la solution qu'il a trouvée peut répondre à une première demande du client (fictif). On dispose d'une série de documents (dont on trouvera des exemples en annexe I), mais aucun n'est présenté tant que le sujet n'en a explicitement fait la demande.

La situation de verbalisation simultanée permet un enregistrement des verbalisations. On relance le sujet si les temps de réflexion silencieuse sont trop longs ou trop fréquents. Dans la mesure où les documents disponibles sont souvent utilisés par les sujets comme des supports matériels, on filme aussi la passation, car un enregistrement uniquement verbal ne permettrait pas toujours de comprendre quelles informations ou indications manipule le sujet.

4.2 Méthodologie d'analyse

Interpréter des raisonnements de conception sous l'angle d'expression et de gestion de contraintes nécessite de mettre au point des descripteurs des protocoles verbaux recueillis auprès des sujets. La première phase d'élaboration du cadre méthodologique, que l'on expose en première partie, a consisté à transformer les protocoles bruts en protocoles analysables en les découpant en unités d'expression qui se différencient selon la catégorie à laquelle elles appartiennent. On obtient ainsi une description des protocoles, qui rend compte des connaissances déclaratives, ou représentations, mises en oeuvre par les concepteurs et qui décrit aussi les traitements appliqués.

4.2.1 Découpage des protocoles

La première difficulté que l'on rencontre réside dans le découpage des textes en unités d'expression, qui va permettre d'assurer la fiabilité des analyses et des comparaisons. Ce découpage est intimement lié aux caractéristiques de l'activité de conception. Pour chaque unité linguistique, on se pose la question de savoir de quelle opération cognitive elle procède: expression d'un but à atteindre, description d'un état intermédiaire de la solution, recours à une procédure d'exécution, explicitation d'une stratégie de résolution, etc. On obtient par exemple le découpage suivant:

"Comme réseau, d'une manière relativement simple, c'est un backbone en fibre optique ici avec différents points de contact où viendraient se raccorder les réseaux / Donc on aurait un backbone...le centre de calcul serait un point de contact sur ce backbone, au même titre que les autres et ce serait en fibre optique / Donc ce serait une partie du réseau, les points de contact se feraient au niveau 3 avec des routeurs / Je crois que c'est préférable sur un réseau pareil / ..."

Chaque protocole brut est ainsi transformé en protocole analysable. Par conséquent, l'élaboration des descripteurs des diverses unités d'expression est progressivement construite au cours d'une analyse préalable d'un protocole, à partir duquel on cherche à définir des catégories distinctes d'unités d'expression. On a d'abord extrait toutes les unités d'expression formant la catégorie des contraintes, car on dispose pour ces items-là d'une description formelle déjà établie (cf. § 2.2.1 et 2.2.2). Puis on a déterminé des descripteurs complémentaires afin de rendre compte des unités restantes. La section suivante expose ces différentes catégories.

4.2.2 Catégorisation des unités d'expression

On décrit dans cette section les différentes catégories d'unités d'expression qui ont été mises au point pour élaborer une méthodologie d'analyse de l'activité de conception en termes de contraintes.

a) Contraintes

On a proposé au second chapitre (§ 2.2.1) une définition opérationnelle du concept de contrainte: une contrainte implique une relation entre plusieurs variables, et est par conséquent un sous-ensemble du produit cartésien issu du croisement des domaines de valeurs de ces variables (un cas particulier est la relation qui associe une variable unique à une contrainte). Cette formalisation peut être appliquée pour une méthodologie d'analyse des protocoles et permet de déceler aisément les unités de la catégorie *Contrainte* dans un protocole verbal, à chaque fois qu'on peut constater une relation entre des variables. Le but ici n'est pas de caractériser nommément ces contraintes, mais simplement de les signaler dans le protocole.

Un affinement de ce codage était nécessaire, eu égard aux distinctions entre contraintes de validité et de préférence (§ 2.2.3) d'une part et contraintes prescrites et déduites (§ 2.2.2) d'autre part. Contraintes de validité et contraintes de préférence sont différenciées sur la base de critères dépendants de la connaissance du domaine: les contraintes de validité sont celles qui doivent être satisfaites par le concepteur pour que le réseau informatique fonctionne; les contraintes de préférence sont celles qui n'ont pas à être satisfaites obligatoirement, mais que le concepteur s'impose préalablement ou au cours du problème.

Contraintes prescrites et contraintes déduites sont distinguées de fait grâce à la méthode d'information à la demande qui a été employée (§ 3.2.3): lorsque le concepteur s'enquiert des prescriptions du cahier des charges, il passe en revue celles des contraintes prescrites dont il veut tenir compte pour la conception du réseau. Par opposition, les contraintes déduites sont celles que le concepteur retrouve en mémoire, ou bien celles dont il construit les termes au cours du processus de résolution.

Pour procéder aux premières investigations sur les aspects de gestion de contraintes, on a déterminé et indiqué sur les protocoles les différentes opérations qui ont été appliquées par les concepteurs. On a distingué trois traitements appliqués aux contraintes: contraintes seulement formulées, contraintes formulées et satisfaites dans le même temps, contraintes dont la formulation est dissociée de leur satisfaction.

b) Autres catégories

Trois catégories complémentaires à la catégorie "Contraintes" ont été établies afin de rendre compte de toutes les autres unités d'expression apparaissant dans les protocoles. Comme on l'a déjà noté, ces catégories s'appliquent non pas au sens du texte (au sens de l'analyse de contenu), mais rendent compte des opérations cognitives qui se déroulent dans le processus de résolution. La catégorisation qui a été faite ici sera vraisemblablement affinée voire modifiée à l'issue de cette étude. Pour l'heure, elle fournit une base de travail satisfaisante.

Méta-plan

Dans cette catégorie, dont la terminologie est empruntée à Hayes-Roth et Hayes-Roth (1979), sont rangées toutes les unités d'expression qui exposent une décision que prend le sujet sur la manière d'approcher le processus de planification ou bien qui exposent à un méta-niveau des décisions concernant la résolution du problème. On y adjoint aussi les unités d'expression qui rendent compte des inférences que le sujet fait à propos de données du problème. Cette catégorie est composée de cinq sous-catégories que l'on définit ici, accompagnées d'exemples issus des domaines de la conception de réseaux informatiques et de l'architecture:

- des stratégies de résolution du problème. Ce sont des démarches de résolution qui, établies au cours de l'expérience, sont déjà connues des concepteurs:

"un projet se fait en différentes étapes; ici, il faut présenter la solution de base, et les idées pour connaître les traits de notre solution ..."

Les unités d'expression classées comme des "stratégies", même si elles peuvent être comprises au premier abord comme des contraintes, ne sont pas assimilées comme telles: bien que l'expression d'une relation soit en effet formulée dans ces unités d'expression, il n'est généralement pas possible de définir des valeurs aux termes de la relation. Par exemple:

"il faut de facto minimiser les prix au maximum, et optimiser l'implémentation, pour présenter quelque chose de solide sans parler d'optimisation réelle au niveau du trafic"

Ici, une relation entre la variable "optimiser l'implémentation" et la variable "optimiser le trafic" est exprimée. Mais la définition qu'on a adoptée pour les unités "Contraintes" ne peut pas être appliquée, car "optimiser l'implémentation" ne peut pas être considéré comme une variable, car on ne peut déterminer clairement un ensemble de valeurs à lui associer; de même, "optimiser le trafic" est plus une recommandation d'ordre stratégique qu'une variable dont on pourrait précisément énoncer les valeurs.

- des tactiques de résolution du problème. Ce sont des procédures de résolution que l'expert emploie afin de planifier non pas le problème, mais le processus de planification lui-même:

"J'ai essayé de schématiser toutes les pièces; c'est un organigramme qui prend en compte en même temps la disposition des choses" (architecture)

"donc on pourrait dire que ça, c'est le réseau A; et ça, le réseau B"

- des descriptions ou des décisions portant sur le cheminement de résolution. Cette catégorie est proche de la précédente, en ce sens que ses unités s'appliquent aussi au processus de planification:

"j'ai assez de questions, je peux prendre une décision maintenant"

"...d'où la constatation : il faut téléphoner au client, (pour savoir si la cuisine au sud est vraiment indispensable)" (architecture)

- des évaluations sur le cheminement adopté:

"je ne sais pas si ça, ça sera la meilleure solution"

"c'est vraiment conceptuel, ici; c'est pas une solution qui ressemble vraiment à quelque chose"

-des inférences établies sur les données du problème:

" mais ils vont avoir accès à quoi, ces PC? Je suppose à une base de données administrative, mais je ne la vois pas située au niveau du développement, et pas non plus au niveau du centre de calcul...A mon avis, ils ont accès aux deux réseaux"

Plan

On affecte à cette catégorie toutes les unités d'expression qui rendent compte des intentions d'élaboration et/ou de mise en œuvre d'une solution: le sujet expose les traits généraux de la configuration qu'il va adopter, ou qu'il pourrait adopter. Il exprime en quelque sorte une solution abstraite, une "idée" de solution, dont la validité n'est pas encore confirmée au niveau de l'exécution détaillée. On trouvera par exemple:

"...tout ça, ça correspond à une idée de construction en même temps; l'idée, c'est de ne pas avoir de charpente et c'est simplement de lancer un madrier à chaque fois d'un mur à l'autre et puis de poser par-dessus la couverture" (architecture)

ou encore

"si ceci est une colonne vue verticalement, il faut passer dans la gaine technique pour faire la distribution première du réseau, et à chaque étage, depuis les gaines, on aurait des segments qui partiraient comme ceci; c'est ce que j'ai en tête; mais on peut faire une distribution très différente du réseau, avec une distribution de base dans une ou deux colonnes, avec de longs segments horizontaux parcourant le bâtiment. "

Exécution

Les expressions qui seront affectées à cette catégorie traduisent soit la mise en œuvre "concrète" des solutions "abstraites" envisagées auparavant dans le plan, et constituent par conséquent un raffinement ou une remise en cause de ces solutions, soit l'application de procédures d'exécution que l'expert teste directement à un niveau de détail de son problème. On a par exemple:

"on peut avoir ici un câble Ethernet sur lequel on peut mettre huit machines..."

"si je veux mettre la cuisine au sud, automatiquement, elle va venir ici et sera séparée du séjour" (Architecture)

Dans la perspective d'une analyse en termes de contraintes, les protocoles verbaux seront lus en appliquant les repères méthodologiques que l'on vient d'exposer. Dans un premier temps, toute unité d'expression sera d'abord évoquée avec la possibilité d'être interprétée comme une contrainte. Le repérage des variables qui lui sont associées sera extrêmement utile à cet égard. Si la définition qui a été formulée ne peut être appliquée à l'item considéré, on cherche alors à quelle autre catégorie il appartient.

4.3 Hypothèses

Les hypothèses que nous allons énoncer ont été testées en considérant la contrainte comme une variable dépendante, dont on a mesuré les variations dans les protocoles. Les dénombrements ont été faits sur la base du comptage des *unités d'expression* pour chacune des catégories définies précédemment. Ces hypothèses portent sur:

- **l'usage que les sujets font des contraintes, relativement aux autres catégories d'expression** qu'ils manipulent, et la comparaison des processus de résolution des experts de ce point de vue. En effet, on ne peut justifier l'élaboration d'un modèle psychologique de l'activité de résolution de problèmes fondé sur la gestion de contraintes que dans la mesure où il va au-delà d'une interprétation locale du processus de conception.

On peut faire l'hypothèse que l'emploi d'unités d'expressions de la catégorie *Contrainte* (Contraintes prescrites plus Contraintes déduites) sera plus fréquent que l'usage des autres catégories d'items. On peut aussi supposer que gérer des contraintes est un processus commun à tous les concepteurs. Le recours à cette catégorie serait alors effectué, pour les experts comme pour les novices, en proportion relativement égale. Une comparaison de l'usage de cette catégorie, en terme de fréquence d'apparition dans les protocoles, permettra d'invalider ou de confirmer cette hypothèse.

- **l'usage des contraintes en fonction de leur nature** (en termes de contraintes de préférence et de contraintes de validité), selon les niveaux d'expertise des sujets.

On peut mettre à l'épreuve l'hypothèse que des concepteurs de niveaux d'expertise différents ne feront pas, en terme de fréquence, le même usage de ces deux contraintes. On prévoit que les experts feront un usage plus fréquent des contraintes de préférence, parce qu'ils en connaissent les termes (connaissances qui ne sont sans doute pas très bien établies chez l'expert intermédiaire), ou bien parce qu'ils fondent leur processus de résolution sur une formulation préalable des contraintes de préférence, dont l'expression constituerait pour eux des points de repère ou des guides pour l'élaboration de la solution.

- **la gestion des contraintes dans le cours du processus, selon que celles-ci sont de préférence ou de validité**

On s'intéressera à la façon dont les contraintes ont été gérées au cours du cheminement de résolution. On examinera comment les opérations de formulation et satisfaction sur les contraintes sont exécutées, en fonction du niveau d'expertise des concepteurs et selon la nature des contraintes concernées.

5 RESULTATS

On expose en première partie de cette section les résultats obtenus pour ce qui concerne les hypothèses évoquées dans le chapitre précédent: d'une part, l'usage global que les experts font des contraintes relativement à l'emploi d'autres catégories d'unités d'expression, d'autre part, la pertinence d'une distinction entre deux natures de contraintes (préférence et validité) et enfin le mode de gestion de contraintes qui est employé dans les processus de résolution. Les données sont analysées et interprétées en fonction de deux objectifs: d'une part, tester le cadre méthodologique afin de l'affiner et d'autre part, dégager des perspectives d'approfondissements théoriques.

5.1 Usage des contraintes relativement aux autres catégories

Le dénombrement des unités d'expression pour chaque catégorie permet de constater l'usage qui est fait des *Contraintes* relativement à celui qui est fait des autres catégories de descripteurs. Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

Catégories	Sujets	Experts				Novices			
		1	2	3		4	5	6	
Nombre total d'unités d'expression		94 (100)	90 (100)	103 (100)	m (%)	80 (100)	53 (100)	110 (100)	m (%)
Méta-plan		9 (9,5)	3 (3)	13 (12,5)	8,7	7 (9)	9 (17)	13 (12)	11,9
Plan		10 (10,5)	17 (19)	33 (32)	20,9	18 (22,5)	21 (39)	23 (21)	25,5
Exécution		25 (26,5)	23 (25,5)	11 (10,5)	20,6	21 (26)	12 (22,5)	19 (17)	21,4
Contraintes déduites (i)		19 (20)	14 (15,5)	16 (15,5)	17,1	23 (29)	9 (17)	32 (29)	26,3 (1)
Contraintes prescrites (ii)	+	31 (33)	33 (36)	30 (29)	32,7	11 (14)	14 (26)	23 (21)	19,7 (2)
Total des lignes (i) + (ii)		50 (53)	47 (51,5)	46 (44,5)	49,8	33 (43)	23 (43)	55 (50)	45,7 (3)

Tableau 1. Emploi de chaque catégorie d'unités (en % entre parenthèses)

On note que:

- a - l'usage d'unités d'expression Contraintes déduites par rapport à l'ensemble des unités d'un protocole est relativement faible: il varie de 15% à 30% selon les concepteurs (ligne 1). Il est toutefois notable de constater que la plus grande dispersion des résultats se situe dans le groupe des novices (de 17% à 29%), qui recourent plus souvent à ce type de contraintes que les experts; ceux-ci manifestent une attitude plus homogène dans l'emploi de cette catégorie (de 15,5% à 20%).

b - l'emploi d'unités Contraintes prescrites est très courant, en particulier chez les experts (en moyenne, environ 33% contre 20% pour les novices - (ligne 2)).

c - l'ajout des unités d'expression de ces deux sous-catégories de Contraintes, *Contraintes prescrites* et *Contraintes déduites* est cohérent eu égard à la formalisation adoptée (§2.2). On rend compte ainsi de l'emploi global qui est fait de la catégorie *Contraintes*.: quel que soit le niveau d'expertise des concepteurs, le recours aux Contraintes est extrêmement important (ligne 3 - 49,8% des unités d'expression du protocole pour les experts et 45,7% pour les novices). On note que la dispersion faible des résultats des six sujets autour de cette moyenne masque en fait une dispersion des résultats obtenus à l'intérieur des sous-catégories *Contraintes prescrites* et *Contraintes déduites* selon le niveau d'expertise: les trois experts recourent de la manière semblable aux deux sous-catégories, alors qu'il existe une importante variabilité inter-individuelle chez les novices. On voit que les sujets 4 et 6 utilisent peu de *Contraintes prescrites* mais recourent par contre à un nombre élevé de *Contraintes déduites*. Il faut noter que ces deux sujets sont à notre connaissance un peu moins expérimentés que le sujet 5 qui lui, emploie *Contraintes prescrites* et *Contraintes déduites* comme le font les sujets du groupe *Experts*.

d - l'usage des catégories Plan, Méta-plan, et Exécution est hétérogène pour ce qui concerne le niveau d'expertise et aucune caractéristique notable du processus de conception ne peut ici être mise en évidence.

Ces résultats confirment que les contraintes (qu'elles soient prescrites ou déduites) sont un composant essentiel du processus de résolution de problèmes de conception (point c), et ceci quel que soit le niveau d'expertise du concepteur. Ceci justifie par conséquent l'élaboration d'un modèle de l'activité des concepteurs en ces termes. De plus, la distinction entre *Contraintes prescrites* et *Contraintes déduites* est pertinente sur le plan psychologique puisqu'on constate que l'emploi qui est fait de l'une et l'autre catégorie caractérise le niveau d'expertise du concepteur: les experts recourent plus fréquemment à la catégorie *Contraintes prescrites* que les novices (point b) qui ont tendance à utiliser plus fréquemment les *Contraintes déduites*. L'usage des *Contraintes déduites* est de plus homogène dans le groupe des experts, alors que les novices l'emploient de façon beaucoup plus hétérogène (point a).

L'interprétation de ces premières données conduit à s'interroger sur quatre points, d'ordres méthodologiques et théoriques, qui seront discutés et développés dans le dernier chapitre. Sur le plan méthodologique, des questions se posent à propos de la fiabilité de la catégorisation des unités d'expression. On a vu par exemple que les unités de la classe *Méta-plan* pourraient être distinguées plus finement. On peut aussi penser que des termes d'unités de *Contraintes* ont été, du fait de leur formulation, rejetés dans d'autres catégories. Par ailleurs, le dénombrement des

unités d'expression des catégories *Contraintes prescrites* et *Contraintes déduites* pose des problèmes de méthode auxquels il faudra réfléchir. Sur le plan théorique, on doit s'interroger à propos de l'équivalence des contraintes entre elles: sont-elles toutes de même complexité ? Ne devrait-on pas déterminer des emboîtements de contraintes ? Enfin, les unités d'expression catégorisées dans la classe *Méta-plan* renvoient à une réflexion sur l'activité d'évaluation au cours de la gestion de contraintes.

5.2 Contraintes de validité et contraintes de préférence

L'hypothèse est que des concepteurs de niveaux d'expertise inégaux feront un usage différent des contraintes, selon que celles-ci sont de préférence ou de validité. On prévoit que les experts emploieront plus souvent des contraintes de préférence (§ 4.3). On constate dans le tableau 2 que l'usage de l'une ou l'autre nature de contrainte est assez homogène au sein du groupe des novices: ceux-ci emploient préférentiellement des contraintes de validité 58,5% (en moyenne). Les experts ont un comportement plus hétérogène, puisque deux d'entre eux (sujets 2 et 3) utilisent un plus grand nombre de contraintes de préférence, alors que le sujet 1 recourt essentiellement à des contraintes de validité. Par conséquent, bien qu'il semble que l'usage de l'une ou l'autre contrainte diffère en fonction du niveau d'expertise, il faudra approfondir ce point ultérieurement.

Sujets	Experts			Novices		
Nature des contraintes						
Nombre total de contraintes	19 (100)	14 (100)	16 (100)	23 (100)	9 (100)	32 (100)
Préférence	5 (26)	8 (57)	11 (69)	10 (44)	3 (33)	15 (47)
Validité	14 (74)	6 (43)	5 (31)	13 (56)	6 (66)	17 (53)

Tableau 2. Nature des contraintes

5.3 Opérations sur les contraintes

Les natures des contraintes ayant été distinguées dans le codage des protocoles, on a procédé à leur dénombrement et on a noté leurs modalités d'expression: contraintes seulement formulées, ou bien formulées et testées dans le même temps, ou encore contraintes formulées puis satisfaites. Les résultats apparaissent dans le tableau suivant:

Sujets		Experts			Novices		
Expression des contraintes		1	2	3	4	5	6
Nombre total de contraintes		19 (100)	14 (100)	16 (100)	23 (100)	9 (100)	32 (100)
Contraintes seulement formulées	Préférence	4 (21)	3 (21,5)	6 (37,5)	6 (26)	0 (0)	15 (47) (5)
	Validité	1 (5)	2 (14)	3 (19)	6 (26)	3 (33)	13 (40,5)
	Total	5 (26)	5 (36,5)	9 (56,5)	12 (52)	3 (33)	28 (87,5) (1)
Contraintes formulées et testées	Préférence	1 (5)	0 (0)	0 (0)	1 (4,5)	3 (33)	0 (0) (4)
	Validité	9 (48)	4 (28,5)	2 (12,5)	7 (30)	3 (33)	2 (6,5)
	Total	10 (53)	4 (28,5)	2 (12,5)	8 (34,5)	6 (66)	2 (6,5)
Contraintes formulées puis testées	Préférence	0 (0)	5 (36)	5 (31,5)	3 (13)	0 (0)	2 (6,5) (3)
	Validité	4 (21)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	Total	4 (21)	5 (36)	5 (31,5)	3 (13)	0 (0)	2 (6,5) (2)

Tableau 3. Opérations sur les contraintes

- a - il est remarquable de noter que, bien que la distribution soit très dispersée, le nombre de contraintes seulement formulées est élevé (de 26% à 87,5% du nombre total de contraintes), quels que soient les sujets et leur niveau d'expertise (ligne 1). De ce point de vue, on note une disparité entre novices et experts: pour ceux-ci, les contraintes qui sont seulement formulées sont essentiellement des contraintes de préférence; les novices, eux, appliquent ce traitement autant aux contraintes de préférence que de validité (ligne 5).
- b - un autre point différencie les experts des novices quant à l'usage des contraintes de validité et de préférence: les experts semblent procéder volontiers en différant l'opération de satisfaction des contraintes, puisqu'environ 30% des contraintes sont traitées de cette manière (ligne 2). On note que les novices n'opèrent quasiment pas de cette façon (sur environ 10% des contraintes seulement).
- c - il est notable que le résultat que l'on vient d'exposer provient, sauf pour le sujet 1, d'opérations appliquées aux contraintes de préférence (ligne 3): différer le satisfaction d'une contrainte de sa formulation est une opération que deux des experts n'appliquent pas aux contraintes de validité.

d - en revanche, l'opération simultanée satisfaction/formulation des contraintes n'est pas appliquée aux contraintes de préférence (ligne 4), sauf par le sujet 5; elle porte principalement sur les contraintes de validité.

Ainsi, les résultats obtenus confirment qu'il est pertinent de faire la distinction entre *contrainte de préférence* et *contrainte de validité* du point de vue des opérations qui leur sont respectivement associées. En effet, alors que dans la plupart des cas, les contraintes de validité sont formulées et satisfaites simultanément (point d), les contraintes de préférence se propagent très différemment puisque leur satisfaction est, soit absente du protocole verbal (point a), soit différée parfois longtemps après que leur formulation a été faite (points b et c).

5.4 Conclusion

Les résultats que l'on vient d'exposer confirment l'intérêt d'élaborer un modèle de l'activité de conception en termes de contraintes puisque près de la moitié des représentations manipulées par les concepteurs sont formalisables comme des contraintes. Parmi celles-ci, les contraintes prescrites semblent jouer un rôle important en particulier pour les experts. Une distinction très nette apparaît entre contraintes de préférence ou de validité, pour lesquelles les traitements appliqués par les concepteurs diffèrent selon leur niveau d'expertise: les résultats obtenus suggèrent que les experts procéderaient en invoquant plutôt des contraintes de préférence, tandis que les novices appuieraient leur raisonnement de conception sur les contraintes de validité. Le niveau d'expertise pourrait donc être caractérisé par des *représentations* différentes. Cependant, c'est surtout sur le plan des *traitements* que se situent d'une manière beaucoup plus marquée les écarts de compétences. En premier lieu, les contraintes ne sont pas gérées de la même façon selon leur nature puisque les contraintes de préférence sont souvent formulées dès le début de leur conception et satisfaites plus en aval du processus de résolution, alors que les contraintes de validité sont en général formulées et satisfaites simultanément. En second lieu, la manière de gérer ces contraintes varie selon le niveau d'expertise: on constate que les experts procèdent soit en formulant seulement ces contraintes, soit en différant l'opération de satisfaction. C'est cette dernière modalité que les novices s'avèrent incapables de pratiquer: il ne savent pas, ou mal, différer les opérations portant sur les contraintes.

Ces premières conclusions doivent être confirmées par des investigations expérimentales plus approfondies, qui impliquent des modifications du cadre méthodologique ainsi que des développements théoriques. Ces perspectives de recherche sont présentées dans la section suivante.

6 DISCUSSION ET CONCLUSION

L'interprétation des résultats conduit à une évaluation du cadre méthodologique adopté et met en évidence les axes théoriques qui doivent être développés. On discute ces questions dans ce chapitre. Dans la mesure où une modification méthodologique entraîne généralement un approfondissement théorique, et vice versa, on ne distinguera pas toujours explicitement ces deux versants dans les remarques qui suivent.

6.1 Fiabilité de la catégorisation

La catégorisation sur laquelle se fonde la méthodologie d'analyse des protocoles doit être affinée afin d'être rendue plus fiable. Ainsi, des questions se posent par exemple pour les unités d'expression affectées au *Méta-plan*. Certaines d'entre elles sont situées à un méta-niveau, dans le sens où elles sont relatives à des décisions qui concernent la planification du problème: il s'agit ici des unités que l'on a affectées aux sous-catégories *Evaluation* et *Inférence*, et qui rendent compte essentiellement d'activités de contrôle sur les états successifs du problème. En revanche, les unités d'expression des sous-catégories *Stratégie*, *Tactique* et *Description* rendent compte de décisions sur la planification du processus. Il est donc nécessaire de reconsidérer la description de cette catégorie et de préciser la signification cognitive des unités d'expression qu'on lui affecte. Ceci conduira probablement à créer une catégorie supplémentaire d'unités d'expression.

Une autre remarque doit être faite à propos des unités d'expression incluses dans les catégories *Plan* et *Exécution*, qui sont directement liées à la formulation ou/et à la satisfaction des contraintes, en ce sens qu'elles décrivent des états directement issus de l'application des contraintes. Par conséquent, il faudra considérer cette dépendance et justifier que l'on dissocie les contraintes des états qu'elles produisent, soit en cherchant à en rendre compte, soit en justifiant l'autonomie de ces unités par rapport aux contraintes.

6.2 Dénombrement des unités d'expression de la catégorie *Contraintes*

On a procédé aux dénombrements des *Contraintes* sans tenir compte du fait que les sujets recourent parfois à une même unité d'expression de cette catégorie à plusieurs reprises au cours de la résolution du problème. Par conséquent, le nombre total de ces unités ne rend pas compte du fait que certains concepteurs réintroduisent plusieurs fois de suite la même contrainte dans le cours de leur processus. Selon la signification psychologique qu'on confère à ces répétitions d'unités d'expression (nécessité d'introduire en plusieurs points du processus de résolution le même élément, ou bien "défaut de mémoire" du concepteur qui ne se souvient plus des termes initiaux du problème?), on peut déclarer qu'on a réellement rendu compte dans les comptages

d'un aspect de la gestion de contraintes, ou bien on peut considérer qu'on a introduit un biais important dans les résultats. Il conviendra par conséquent de résoudre cette question.

6.3 Niveaux de contraintes

Les contraintes sont définies par la nature des variables qui leur sont associées. Or, telles qu'elles sont formulées par les concepteurs, ces variables n'ont pas toutes le même degré de complexité. Regardons par exemple les deux variables suivantes: "*type-de-câble* { fibre optique, thick, thin }"; "*distance-à-câbler* { de 0 à ∞ }. Elles sont liées par une contrainte fréquemment formulée par les concepteurs comme "le type de câble à choisir dépend de la distance qu'on doit câbler". En fait, l'application de cette contrainte invoque une variable implicitement traitée, qui est la "*longueur-maximale*" admise par chacun des types de câbles, telle que { thin -> 185 m; thick -> 500m; fibre optique -> 3000 }. Cette variable crée une partition de la variable "distance à câbler", dont on a donné l'exemple en § 2.2.1. Ainsi, un emboîtement est tacitement traité. Par conséquent, il n'est pas assuré que toutes les contraintes soient nécessairement équivalentes, au regard de leur structure et de leur contenu: la complexité des variables qui leur sont associées, leur nombre, leurs intrications et leurs emboîtements, etc.

Ce problème suggère d'introduire dans le cadre méthodologique la notion de *Méta-contrainte*. Plusieurs sens ont été attribués à ce concept. Pour Stefik (1981b), une contrainte est "méta" quand elle s'applique à la planification du processus; ce sont les unités que nous avons dans cette étude rangées dans la catégorie *Méta-plan*. Pour Berlandier (1988), une "méta-contrainte" est une contrainte qui rend compte de dépendances entre deux ou plusieurs contraintes; ce point de vue semble répondre plus précisément à la question que nous soulevons dans ce paragraphe. Il faudra donc, en rapport à notre problématique, définir la notion de contrainte de niveau méta et l'intégrer au cadre méthodologique.

6.4 Activité d'évaluation et gestion de contraintes

Les activités de gestion de contraintes comprennent naturellement des phases d'évaluation des états intermédiaires issus de l'application des contraintes aux termes du problème. La méthodologie adoptée pour l'analyse des protocoles ne distingue pas ces phases d'évaluation de l'expression même des contraintes: on considère que l'évaluation est comprise dans l'opération de *satisfaction* des contraintes. En revanche, toutes les activités d'évaluation liées au contrôle du processus de planification lui-même, sont distinguées et sont inscrites dans la catégorie *Méta-plan*. Ainsi, on a délibérément situé sur deux plans de représentation différents d'une part les unités d'expression rendant compte du contrôle du processus de planification, et d'autre part les expressions d'évaluation résultant directement de l'application des contraintes.

Néanmoins, on peut penser que certaines de ces items devraient être compris comme des contraintes dont la spécificité serait d'être de haut niveau d'abstraction parce qu'elle s'appliquent à une gestion de la planification du processus et non pas à une gestion de la planification du problème (Stefik, 1981b). Il faudrait alors remodeler la catégorie *Méta-plan*, de façon à caractériser les unités d'expression concernées. Conjointement, il faudrait aussi enrichir le formalisme adopté pour la notion contrainte, car les variables associées deviennent alors plus difficilement définissables. Il faudra par conséquent dans des travaux ultérieurs chercher à justifier, ou bien à modifier le principe méthodologique adopté jusqu'alors.

Le problème des activités d'évaluation dans les processus de résolution de problème fait en outre directement référence à l'articulation entre démarches ascendantes et descendantes et gestion de contraintes au sein des activités de planification, dont il faudra préciser les mécanismes.

6.5 Mécanismes de propagation des contraintes et contraintes implicites

La formulation et le développement de nouvelles contraintes à partir des contraintes existantes semblent clairement dépendre de mécanismes de propagation dont il faudra décrire les caractéristiques. L'examen des modes de propagation explicite des contraintes devra être détaillé dans les recherches ultérieures. En outre, des éléments laissent supposer qu'un mode de propagation implicite des contraintes agit fortement au cours de la résolution du problème. D'une part, les résultats expérimentaux font apparaître un nombre élevé de contraintes qui sont seulement formulées. D'autre part, on a évoqué en § 6.3 l'existence de contraintes implicitement traitées dans le cours de la résolution parce qu'elles seraient dépendantes de contraintes de plus haut niveau. Il sera donc tout à fait essentiel de procéder à des investigations expérimentales complémentaires afin de comprendre les mécanismes de propagation des contraintes. Il faudra alors rendre compte de leurs propriétés dans le cadre méthodologique. D'une manière plus générale, c'est l'ensemble des connaissances procédurales manipulées par les concepteurs et des traitements qui participent aux processus de conception qui devront être explorés de façon plus approfondie.

6.6 Conclusion

On a montré que les processus de résolution de problèmes de conception peuvent être compris comme des activités de gestion de contraintes. Dans le cadre de cette étude, on a essentiellement cherché à appréhender le caractère déclaratif de la notion de contrainte et à en rendre compte comme d'une représentation cognitive. On a proposé une définition opérationnelle qui décrit la contrainte comme une relation entre des termes de valeurs variables. Appliquée à l'analyse de données recueillies au cours d'une activité de configuration de réseaux informatiques, cette

formalisation montre que le raisonnement cognitif est effectivement fondé pour moitié sur l'expression des contraintes liées au problème.

Une telle formalisation de la notion de contrainte pourrait cependant être réducteur dans l'objectif d'une analyse psychologique de l'activité si les propriétés procédurales de la notion ne sont pas précisément décrites. Saisir les traitements mis en oeuvre par les concepteurs passe par la compréhension des activités de gestion de contraintes. Ceci a été ébauché dans ce rapport lorsqu'on a cherché à comprendre comment les opérations de formulation et de satisfaction de contraintes sont exécutées. Les résultats confirment que, selon la nature des contraintes et selon le niveau d'expertise des concepteurs, les traitements appliqués diffèrent.

Les recherches futures doivent par conséquent permettre d'envisager une étude plus fine de ces traitements mis en oeuvre par les concepteurs, tout en affinant la compréhension des qualités déclaratives de la notion de contrainte. Afin de mieux rendre compte en particulier de la façon dont le système de contraintes est géré au cours du problème et du rôle qu'il joue dans les activités de planification, il faudra décrire l'articulation des démarches ascendantes et descendantes avec les activités de gestion des contraintes, rendre compte du caractère explicite ou implicite de la propagation des contraintes et déterminer le rôle des activités d'évaluation et de contrôle sur l'élaboration de la solution. On devra poursuivre la compréhension des connaissances déclaratives invoquées en cherchant en particulier à déterminer les systèmes de représentation auxquels les contraintes sont rattachées et en intégrant dans le modèle la notion de méta-contrainte.

Ces axes de recherche conduiront à enrichir le cadre théorique dans lequel s'inscrit cette problématique et à le compléter à partir de travaux réalisés autant en intelligence artificielle qu'en psychologie. Ceci permettra de parfaire les outils méthodologiques et on pourra alors évaluer les conditions de validité d'un modèle de l'activité psychologique articulé autour de la notion de gestion de contraintes. Ce faisant, on participera à la spécification d'aides logicielles pour la conception assistée par ordinateur. En effet, si les observations exposées dans ce rapport sont confirmées, on peut penser que la conception des logiciels existants sur un modèle de gestion de contraintes représenterait une amélioration ergonomique notable des systèmes d'aide à la conception.

BIBLIOGRAPHIE

- Berlandier, P. (1988) Intégration d'outils pour l'expression et la satisfaction de contraintes dans un générateur de systèmes experts. Rapport n° 924, Sophia-Antipolis, France : INRIA.
- Bisseret, A. (1987) Bulletin de liaison de la recherche en informatique et en automatique, Rocquencourt, France : INRIA, n° 115.
- Bisseret A., Figeac-Letang C., Falzon P. (1988) Modeling opportunistic reasonings : The cognitive activity of traffic signal setting technicians. Rapport n° 898. Rocquencourt, France : INRIA.
- Bonnardel, N. (1989) L'évaluation de solutions dans la résolution de problèmes de conception. Rapport n° 1072. Rocquencourt, France : INRIA.
- Brinkley, J., Buchanan, B., Altman, R., Duncan, B., Cornelius, C. (1987) A heuristic refinement method for constraint satisfaction problems. Knowledge systems laboratory. Report n° 87-05, Computer science department, Stanford University, janvier 1987.
- Chandra, N., Marks, D. (1986) Intelligent use of constraints for activity scheduling. Applications of IA in engineering problems.
- Darses, F. (1989) Graphical representations in network design. Rapport Technique, Rocquencourt, INRIA, avril 1989.
- Darses, F., Falzon, P. (1989) The design activity in networking. General remarks and first observations. Rapport Technique, Rocquencourt, INRIA, mars 1989.
- Davis, L.S., Rosenfeld, A. (1978) Hierarchical relaxation for waveform parsing. Computer Vision Systems, Allen R. Hanson and Edward M. Riseman (Eds), Academic Press.
- Descotte, Y., Delesalle, H. (1986) Une architecture de système expert pour la planification d'activité. 6èmes Journées Internationales : les systèmes experts et leurs applications, Avignon, mai 1986.
- Descotte, Y., Latombe, J.C. (1985) Making compromises among antagonist constraints in a planner. Artificial Intelligence 27, 183-217.
- Dubois, R., Brésillon, C. (1988). Les réseaux d'ordinateurs. La Recherche, n° 204, novembre.
- Eastman, C. (1969) Cognitive processes and ill-defined problems : a case study of design Emerging methods in environmental design and planning. Proceedings of the design methods group, First International Conference, Cambridge, Ed. Gary T. Moore, Cambridge, Mass : MIT Press, 21-37.
- Eastman, C. (1970) On the analysis of intuitive design processes. Emerging methods in environmental design and planning. Gary Moore (Ed.) Proceedings of the design methods group. First International Conference, Cambridge, Mass.: MIT Press, June.
- Erman, L.D., Hayes-Roth, F., Lesser, V.R. & Reddy, D.R. (1980) The HEARSAY-II speech understanding system : integrating knowledge to resolve uncertainty. Computing Surveys, 12 (2), 213-253.

- Fox, M.S., Allen, B., Strohm, G. (1982) Job-shop scheduling : an investigation in constraint directed reasoning. Proceedings of AAAI-82, Pittsburgh.
- Guesgen, H., Junker, U., Voss A. (1987) Constraints in a hybrid knowledge representation system. Architectures and Languages, Proceedings of IJCAI 87, Milan.
- Hayes-Roth, B., Hayes-Roth, F. (1979) A cognitive model of planning. Cognitive Science, 3, 275-310.
- Hoc, J.M. (1983) Analysis of beginners' problem-solving strategies in programming. In T.R.G. Green, S.J. Payne, G.C. van der Veer (Eds). The psychology of computer use. London : Academic Press, 143-158.
- Hoc, J.M. (1987) Psychologie cognitive de la planification, Grenoble : PUG.
- Janssen, P., Jégou, P., Nouguier, B., Vilarem, M.C. (1989) Problèmes de conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes. 9èmes Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications, 29 mai-2 juin, vol.1, 71-84.
- Lawson, B.R.(1978) The architect as a designer. In W.T.Singleton (Ed.) The study of real skills : the analysis of practical skills, vol 1. St Leonardgate : MTP.
- Lebahar, J.C. (1983) Le dessin d'architecte. Roquevaire : Parenthèses.
- Leler, W. (1985) Constraint languages for computer aided design. SIGDA Newsletter, vol 15, n° 2.
- Mackworth, A.K. (1977) On reading sketch maps. Proceedings of IJCAI, , vol 2, Cambridge, Massachussetts, 22-25 août.
- Mackworth, A.K. (1987) Constraint satisfaction. In S.Shapiro (Ed), Encyclopedia of Artificial Intelligence. New-York : Wiley, 205-211.
- Manago, C. (1985) Lego : un système qui traite des contraintes. Actes de Cognitiva 85, Application à la CAO dans le bâtiment. Paris, 4-7 juin.
- Meseguer, P. (1989) Constraint satisfaction problems : an overview. AICOM, vol 2, n° 1, mars 1989.
- Mittal, S., Frayman, F. (1987) Making partial choices in constraint reasoning problems. Proceedings of AAAI, juillet.
- Montanari, H. (1974) Networks of constraints : fundamental properties and applications to picture processing. Information Sciences, 7, 95-132.
- Nadel, B.A. (1986) The general consistent labeling (or constraint satisfaction) problem. Technical Report, Department of computer science, University of Michigan.
- Nii, H.P. (1986a) Blackboard Systems : Part One : The blackboard model of problem solving and the evolution of blackboard architectures. The AI Magazine, july 1986, 38-53.
- Nii, H.P. (1986b) Blackboard Systems : Part Two : Blackboard application systems, blackboard systems from a knowledge engineering perspective. The AI Magazine, august 1986, 82-106.

- Oplobedu, A., Marcovitch, J., Tourbier, Y. (1989) CHARME : un langage industriel de programmation par contraintes, illustré par une application chez Renault. 9èmes Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications, 29 mai-2 juin, vol.1, 55 -70.
- Quintrand, P. (1985) La conception assistée par ordinateur en architecture. Paris : Hermès.
- Rosenfeld A., Hummel R.A., Zucker, S. (1976) Scene labeling by relaxation operations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.6, n° 6, june 1976.
- Sacerdoti, E.D. (1974) Planning in a hierarchy of abstraction spaces. Artificial Intelligence, 5, 115-135.
- Sacerdoti, E.D. (1977) A structure for plans and behavior. New-York : Elsevier.
- Sebillotte, S., Bissere, A. (1986) La conception de scénarios interactifs. Rapport n° 537 France : INRIA.
- Sebillotte, S. (1987) La planification hiérarchique comme méthode d'analyse de la tâche. Rapport n° 814, Rocquencourt, France : INRIA.
- Sriram, D., Maher, M.L. (1986). The representation and use of constraints in structural design. Applications of AI in engineering, avril 1986.
- Stefik, M. (1981a) Planning with constraints (MOLGEN : Part 1). Artificial Intelligence, 16, 111-140.
- Stefik, M. (1981b) Planning with constraints (MOLGEN : Part 2). Artificial Intelligence, 16, 141-170.
- Visser, W. (1987) Abandon d'un plan hiérarchique dans une activité de conception. Actes de COGNITIVA 87 ; vol 1. Paris : Cesta.
- Visser, W., Bonnardel, N. (1989) La résolution de problèmes lors de la conception d'une antenne. Analyse de l'activité. Rapport technique, février 1989, Rocquencourt, France : INRIA.
- Whitefield, A.D. (1986a) Constructing and Applying a model of the user for computer system development : the case of computer aided design. Thèse (introduction), University of London, 1986.
- Whitefield, A. (1986b) An analysis and comparison of knowledge use in designing with and without CAD. In A. Smith (Ed.) Knowledge engineering and computer modelling in CAD. Proceedings of CAD 86. London : Butterworths.
- Whitefield, A. (1987) The role of task characterisation in transferring models of users : the example of engineering design. H.J. Bullinger & B. Shackel (Eds) Human-Computer Interaction, Interact'87.
- Whitefield, A.D (1989) Constructing appropriate models of computer users : the case of engineering designers. In J. Long & A. Whitefield (Eds.), Cognitive Ergonomics and Human-Computer Interaction. Cambridge : Cambridge University Press.

ANNEXES

ANNEXE I

SITUATION EXPERIMENTALE

- 1 - Description du problème
- 2 - Exemple de documents présentés aux sujets
 - 2.1 réseau de caniveaux
 - 2.2 description des services

DESCRIPTION DU SITE (document joint)

Longueur totale : 500 mètres

Largeur : 300 mètres

Nombre de bâtiments : 14

Nombre d'étages : 12 bâtiments sont de plein-pied (5*60 mètres) ; ils sont anciens.

Un bâtiment a deux étages (15*140*60) (sur le plan, n°8 à n°13); un bâtiment a un étage (10*140*60) (sur le plan, n°8 à n°13); tous les deux sont neufs; il n'y a pas d'ascenseur.

PASSAGES (document joint)

Présence de caniveaux souterrains pour relier les bâtiments (marqués en noir sur le plan)

Dans les bâtiments neufs, présence de faux plafonds.

Dans les bâtiments anciens, présence de gaines faitières.

DESCRIPTION DES SERVICES (document joint)

BATIMENT 2,3,4,5 : centre de calcul

BATIMENT 6 : restaurant

BATIMENT 7 : siège social, gestion et administration du personnel, relation avec les succursales, relation avec l'étranger

BATIMENTS 24 et 25 : image de synthèse (développement et application)

BATIMENT 8,9,10,11,12,13 : développement et recherche informatique

BATIMENTS 14,15,16,17,18,19,58,52 : prestations télématiques et informatiques (diffusion, documentation, imprimerie,...)

EQUIPEMENT INFORMATIQUE (document joint)

PRESENCE DE SERVEURS :

- d'intérêt général : dans le centre de calcul (Pyramide, bât 2 à 4)
- locaux : Vax , Mips, Sequent (bât 8), Gould (bât 24)

Note : certaines stations SUN (3/150 et plus) assument des fonctions de serveurs.

SALLE INFORMATIQUE :

Les serveurs sont placés dans des salles informatiques (climatisation). La localisation de ces salles n'est pas précisée.

MATERIEL INFORMATIQUE (liste jointe)

Tout le matériel est TCP/IP.

La répartition au sein de chaque bâtiment n'est pas précisée.

- compatibles Ethernet : matra 3/50, 3/110, 3/60,...sun 3/50, 3/60,...Sont en standalone.
- non compatibles Ethernet : il existe des PC dans le bâtiment 7, qui sont connectés sur un réseau Appletalk.

ETAT DU RESEAU EXISTANT

Réseau Appletalk, pour le bâtiment 7.

Réseau de terminaux, à base de concentrateurs pour les stations de travail (connexions RS232).

SOUHAITS DU CLIENT

BUDGET

Appel d'offres...le moins cher possible

MAINTENANCE

Pas de contrainte spécifique

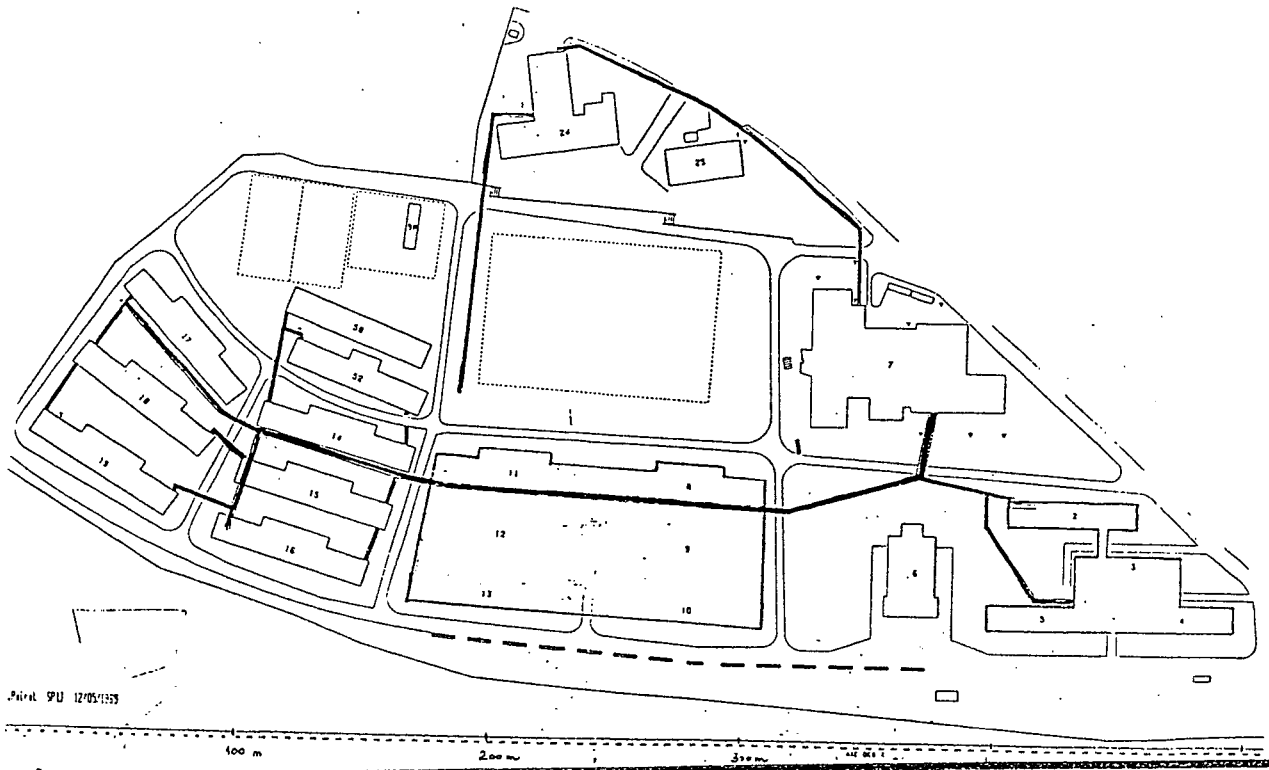
MODE DE CONNEXION

Au sein d'un même bâtiment, le réseau doit être adaptable au besoin et facilement extensible , car les répartitions dans les services et les distributions des machines peuvent changer d'un moment à l'autre.

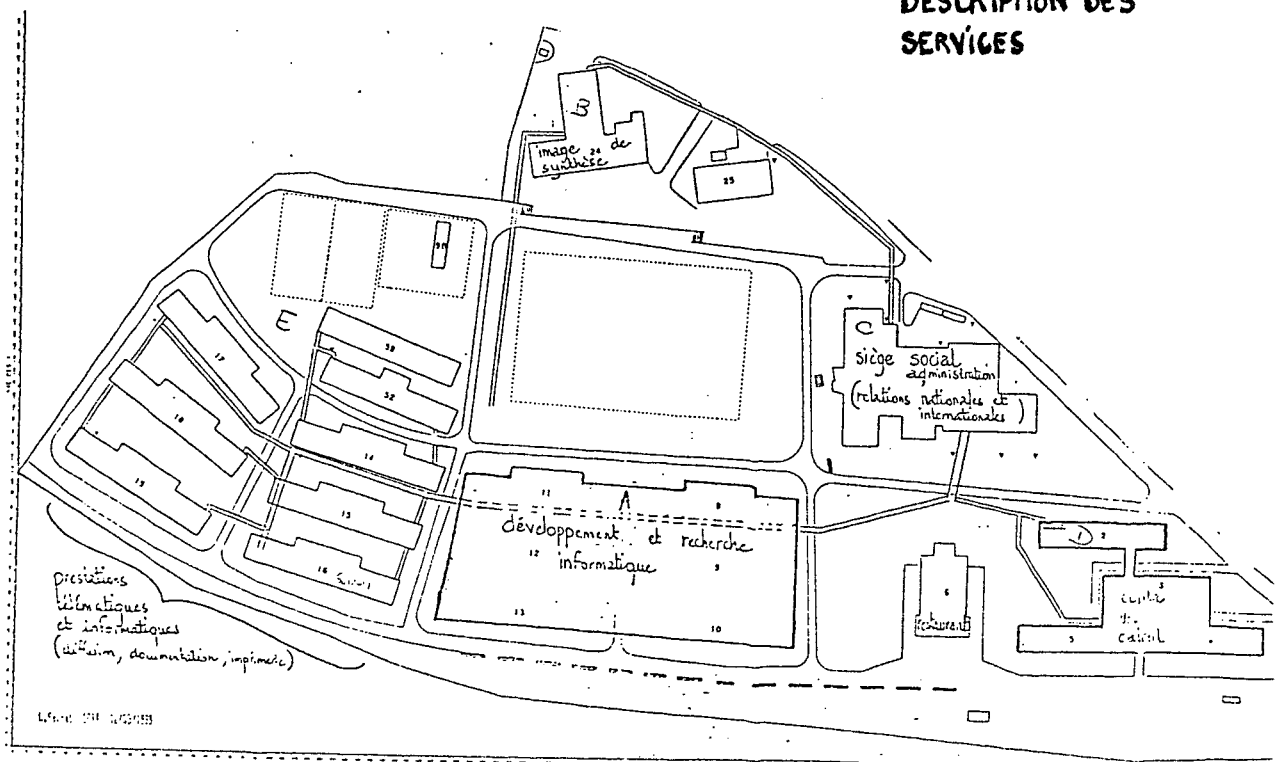
EXTENSION FUTURE

Couverture totale du site pour un trafic dépassant 10Mbps (vers un réseau FDDI)

CANIVEAUX













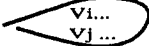
DESCRIPTION DES SERVICES



ANNEXE II

EXTRAIT d'un protocole

Légende

CONTRAINTE PRESCRITE.....	en toutes lettres
METAPLAN	
PLAN	
EXECUTION	
CONTRAINTE DEDUITE ... de PREFERENCE (rond accolé).....	
.....de VALIDITE (croix accolée).....	
.....FORMULEE <u>SEULEMENT</u> (simple trait).....	 ou 
.....FORMULEE <u>ET</u> TESTEE (double trait) ...	 ou 
.....FORMULEE <u>PUIS</u> TESTEE (renvoi par des flèches)	
VARIABLE.....	

CONTRAINTES PRESCRITES

META-PLAN

PLAN

CONTRAINTES DEDUITES

EXECUTION

Sujet K: 1

1. Ici, je suppose qu'il y a une salle où on pourrait placer cela... là, également
5. ce réseau alors pourrait migrer au niveau vers FDDI

au niveau des zones de travail la répartition pourrait se faire alors selon les desiderata des gens sur place

(C4)

Il est clair qu'ici, ça me semble très grand; je ne sais pas s'il y a des bureaux partout... je ne sais pas s'il y a des ordinateurs partout, il n'est peut-être pas nécessaire de prévoir une structure complètement hiérarchisée.

V7 Distribution des 'sous-réseaux' dans le site
V8 Détermination des unités de travail (voir sur plan)

(Aller à C15)

(C5)

Donc à partir du point de contact sur le backbone, tu peux toujours complètement hiérarchiser le réseau, à l'intérieur même du département.

Ça dépend des desiderata des gens... Tu peux peut-être un peu guider le client dans ce choix-là... en fonction de ce que tu sais déjà...

V9 Emplacement des connexions (voir sur plan)
V10 Hiérarchie de la structure du réseau (réalisée complètement, partiellement)

Ce qui serait intéressant, c'est d'avoir une indication plus grande sur la répartition des machines, sur les besoins, les évolutions...

La répartition des machines, je peux te la donner, la voilà... En ce qui concerne les besoins et les évolutions, c'est vrai que le client souhaite que tout le site puisse être s'il le faut complètement câblé.

besoin machines
répartition
câblage du site

7. Donc ça doit rester complètement modulaire... OK

(Il souhaite aussi dans le futur arriver à un réseau FDDI, mais il n'y pense pas immédiatement.)

2. Je ferais ça. Je mettrais un backbone en anneau, qui permettrait (...)

3. où viendraient se greffer des points là, là et là... ce seraient des routeurs

(voir C1)

(C6)

on travaillerait au niveau 3, ça permet une gestion plus facile du réseau.

Là, à partir des routeurs ça dépend un peu des désirs des clients. On peut faire une structure très simple avec un éclatement du réseau chaque fois...

V11 Niveau logique (2, 3, ...)
V12 Qualité de gestion (faible, moyenne, élevée)
(voir C1)

ici, ce sont des bâtiments différents? Oui

(C7)

...ici, c'est relativement simple, à partir des routeurs ça pourrait être un bridge, si on préfère travailler au niveau 2, mais je préfère des routeurs dans ce cas-là...

9. A partir du point de contact, on fait l'éclatement du réseau, de manière modulaire

10. on fait l'extension possible vers un 2ème étage

11. Ici, on prévoit carrément un backbone vertical à l'intérieur du bâtiment

12. et aux étages nécessaires, on met une distribution horizontale

(voir C1)

V1 Type de connecteurs/filtrage (routeur, MIBridge, ...)
V13 Typologie des cas de V2 ou V3 projet

Ce sont tous des couloirs comme ça? Oui, il y a aussi des cloisons à l'intérieur...

emplacement
couloirs

20. Je vois ça de manière relativement simple, pour le moment.

Au RDC, on aurait, de manière simplifiée, on devrait raffiner la solution et mettre un MPR à chaque étage

- 13

X.C.8

l'autant peut-être en prévoir plus pour 40 mètres...

V14 Nombre de segments ou d'éléments des sous-réseaux (de 2 à 20)
V15 Distances (dans le site) des bâtiments (voir sur le plan)

3D et juste ici, c'est plus problématique.
Il y a des contraintes au niveau budget? C'est pas vraiment très pauvre, mais le client ne veut pas non plus un prix... prix raisonnable. Il faut être un peu compétitif...

Il y a des passages? Voilà ce qui existe. Oui, il y a un passage de là à là? Oui.

4E Pour ça et ça, ça va, c'est là (diff) où on peut chipoter...

Il y a un point... il n'y a pas de point central ici? Il faudrait trouver un point relativement central... 1, 2, 3...

14 Oui, c'est ça, je mettrais le routeur qui serait connecté au backbone

15 et je partirais du routeur avec différents segments, vers les différents bâtiments.

Et comme dans ce cas-ci, il n'y a actuellement besoin que de quatre segments, il n'y a pas de problèmes, on a des réserves pour une évolution future.

V47 Nombre de segments libres (de 0 à n)

V46 Extension future (sécurité, non sécurisée)

Ce serait des segments...

Maintenant, il faut voir quel genre de connexions ils désirent dans les bâtiments? Ils veulent des connexions, des machines facilement déplaçables...

C'est un RDC, ici? C'est un environnement bureau il y a des bureaux de part et d'autre du couloir, je suppose? Oui

RdC

et ça mesure 60 sur 20. Oui.

Et ce sont des bureaux de chercheurs? A ce niveau-là, c'est plutôt prestations télématiques, informatiques, diffusion...

Et quel est le futur ici? On pense qu'il y aura une informatisation complète? Pour l'instant, le client ne sait pas tellement encore, mais c'est fort probable. En tout cas, il ne veut pas s'interdire cette possibilité.

5E Pour tout ce bâtiment-ci, je proposerais différentes solutions.

17 De toute façon, un point de rattachement au backbone, avec un routeur

18 et à partir du routeur

19 ou bien partir avec des câbles thick vers chaque bâtiment

20 ou bien faire de nouveau un échelonnement avec de la fibre optique

21 et alors arriver dans chaque bâtiment avec de la fibre optique

22 et là on part en câble coaxial

23 A l'intérieur même des bâtiments, j'envisagerais de nouveau

24 ou bien une distribution systématique dans chaque bureau avec connecteur.

ou alors simplement un câble dans le plafond du couloir, sur lequel viendraient se greffer les différentes connexions.

25 Tu parles de connexions murales? Oui.

6E Donc il y aurait une offre étagée

comme de toute façon, c'est un premier shot, il faut lui présenter les différentes solutions, montrer qu'il y a vraiment le choix entre différents budgets, différentes fonctionnalités, différentes possibilités.

7E

C40 Ça dépendra un peu de ses desiderata.

V16 Extension future

V18 Type de connexions (Vitesse, prises, ...)

V19 Environnement professionnel (recherche, technique)

V20 Budget

5 Il y a la possibilité de faire ou bien...

V1 Type de connecteur (router, MLBridge)

V21 Câbles (Type de) (thin, thick, fibre opt)

C'est possible, C41

C'est possible, mais c'est plus cher

C12 V1 Type connecteur

(voir C11) V21 Câbles

V22 Coût de la solution (économique, moyen, onéreux)

selon les budgets selon à qui le client est prêt

C13 (voir C10) V18 Type de connexion V20 Budget

mais vu le nombre de connexions demandées, je ne crois pas que ce soit vraiment requis

C14 (voir C10) V18 Type de connexion V23 Nombre de connexions demandées

Imprimé en France
par
l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

